

ОБЗОРЫ И ЛЕКЦИИ

УДК 551.508.951:681.785.574

ГЛОБАЛЬНЫЕ ИЗМЕНЕНИЯ КЛИМАТА: «МЕТАНОВАЯ БОМБА» - НАУКООБРАЗНЫЙ МИФ ИЛИ ПОТЕНЦИАЛЬНЫЙ СЦЕНАРИЙ?

Жилиба А.И.¹, Вандышева Г.А.¹, Грибанов К.Г.², Захаров В.И.²

¹Югорский государственный университет, г. Ханты-Мансийск

²Уральский государственный университет, г. Екатеринбург

Обсуждается актуальная проблема растущей эмиссии парниковых газов и особенно метана из резервуаров высокозаболоченной экосистемы в Западной Сибири и примыкающей к ней зоны многолетней мерзлоты. Качественная и количественная оценки близости данной экосистемы к состоянию аномально быстро (в масштабе характерных времен изменения климатической системы) выделения большого количества метана в атмосферу вследствие роста приземной температуры воздуха (сценарий, называемый в специальной литературе «метановая бомба») подразумевает проведение комплексных исследований. Это требует непрерывных наблюдений и моделирования как на тестовых участках (микромасштаб) так и мониторинга в макроскопическом масштабе всей территории Западной Сибири и примыкающей к ней зоны многолетней мерзлоты. В данном обзоре рассматриваются методы спутникового зондирования сезонных вариаций содержания ключевых парниковых газов в атмосфере Западной Сибири и обсуждаются вопросы валидации спутниковых данных с помощью наземных измерений на тестовых участках. Наше исследование находится в начальной фазе реализации данной программы. Получены и представлены первые результаты. Это оригинальные карты, иллюстрирующие сезонное содержание метана в атмосферном столбе [моль/м²] над Западной Сибирью (59–67° с.ш., 60–90° в.д.), полученные из данных AIRS (Atmospheric Infrared Sounder) в 2005 г. Наряду с этим – значения средней концентрации углекислого газа (CO₂) и метана (CH₄) в атмосферном столбе над Средним Уралом, извлеченные из измеренных спектров пропускания в диапазоне волновых чисел 4100–8100 см⁻¹ в солнечные безветренные дни (сентябрь 2009 г., июнь, июль и сентябрь 2010 г.) с низкой концентрацией аэрозоля в атмосфере. Для сравнения приведены результаты, получаемые из спектров, соответствующих состояниям аэрозольно-замутненной атмосферы и значительными вариациями содержания аэрозоля во время измерений (сентябрь 2009 г. и март 2010 г.).

Ключевые слова: Эмиссия парниковых газов, углекислый газ (CO₂), метан (CH₄), атмосфера Западной Сибири, зондирование парниковых газов, экосистемы Западной Сибири.

Цитирование: Жилиба А.И., Вандышева Г.А., Грибанов К.Г., Захаров В.И. Глобальные изменения климата: «метановая бомба» - наукообразный миф или потенциальный сценарий? // Динамика окружающей среды и глобальные изменения климата. Т. 2. № 1(3). EDCCrev0001.

ВВЕДЕНИЕ

Глобальное потепление – парадигма XXI века. Климат Земли является регулирующим фактором жизнедеятельности биосферы в целом и человека в частности. Он определяет стационарный (в смысле глобальных среднегодовых характеристик) термический режим поверхности планеты, возможность длительного и комфортного существования на ней биоты и человека. Климат подчиняет себе природные процессы, которые в свою очередь из-за наличия обратных связей направлены на стабилизацию состава атмосферы. В связи с развитием современной цивилизации возникает опасение, что увеличивающийся антропогенный прессинг на биоту, рост эмиссии парниковых газов и увеличение их концентрации в атмосфере может в будущем превысить допустимые рамки, которые климатическая система способна регулировать. Необходимость в мониторинге парникового эффекта, моделировании климата Земли и прогнозировании его вероятных будущих изменений стимулирует комплексные научные исследования и кооперацию мирового сообщества. Это способствует более углубленному пониманию механизмов накопления парниковых газов в атмосфере и изменения климата нашей планеты.

Надежные палеоклиматические данные свидетельствуют, что в истории эволюции нашей планеты имели место значительные вариации температуры поверхности и приземного воздуха, а теплые климатические периоды чередовались с холодными [Petit et al., 1999; Jouzel et al., 2007]]. Максимальная разница среднегодовых глобальных температур между самыми теплыми и самыми холодными периодами достигала 10-12 градусов Цельсия. В настоящее время климатическая система Земли находится в очередном теплом периоде. Однако, его радикальное отличие от предыдущих теплых

периодов заключается в том, что концентрации таких парниковых газов в атмосфере Земли, как CO_2 и CH_4 , в настоящее время значительно превышают когда либо существовавшие во все теплые периоды за последние около 800 000 лет и продолжают быстро расти. Произошло это резкое изменение всего за 150-200 лет. Подобного роста концентрации ключевых парниковых газов в атмосфере Земли в течение 800 тыс. лет, по-видимому, никогда не было. В настоящее время содержание CO_2 в атмосфере примерно в 1.4 раза, а CH_4 – в 2.4 раза превышают наибольшие их концентрации за последние 800 000 лет, как следует из оценок палеоклиматических реконструкций.

С точки зрения глобальных климатических изменений за последнее столетие наблюдается рост усредненной за год и по всем точкам наблюдения на земном шаре температуры приземного воздуха. Эти температурные тренды заметны не только специалистам, обрабатывающим такого рода данные наблюдений. Некоторые наглядные примеры локальных проявлений глобальных климатических изменений – это таяние ледников и смещение границ мерзлоты. Так, знаменитый африканский ледник на горе Килиманджаро, просуществовавший десятки тысяч лет, по прогнозам гляциологов может практически исчезнуть уже к 2050 г. В Европе и на Гималаях границы горных ледников заметно сместились вверх, наблюдается таяние Гренландского ледяного щита и уменьшение площади и массы льда в Северном Ледовитом океане. Начинается процесс таяния вечной мерзлоты.

Существенным проявлением глобальных климатических процессов являются наблюдаемые в последние десятилетия изменения в атмосферной циркуляции. Это сопровождается резкими колебаниями локальных температур, а также увеличением циклонической активности мирового океана. Наблюдается рост количества и мощности ураганов и аномальных осадков, а также других экстремальных климатических событий.

Современный рост концентрации углекислого газа и метана в атмосфере сопровождается увеличением температуры поверхности Земли. На Рис. 1 приведены данные инструментальных наблюдений среднегодовой температуры приземного воздуха на земном шаре.

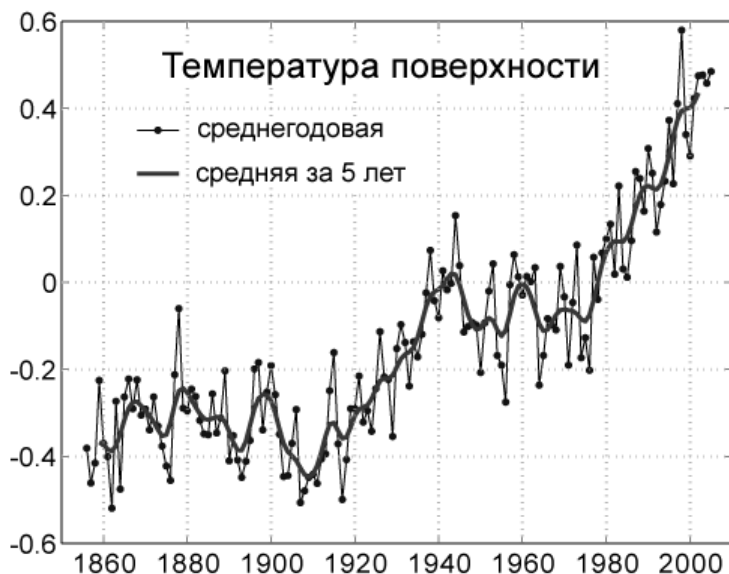


Рис.1. Рост среднегодовой температуры воздуха у поверхности Земли за период метеорологических наблюдений ВМО (Всемирная Метеорологическая Организация): по оси абсцисс отложены годы, по оси ординат – температурная аномалия ($^{\circ}\text{C}$).

Очевидно, что в связи с возрастанием почти на градус среднегодовой температуры океана за последние 150 лет должна увеличиться и равновесная концентрация водяного пара в атмосфере. Относительное изменение концентрации водяного пара в атмосфере (N/N_0) можно выразить формулой:

$$N/N_0 = \exp\left\{\frac{E}{kT_0} \frac{\Delta T}{T_0}\right\} \quad (1)$$

где E – энергия испарения, k – постоянная Больцмана, $T_0 = 287.5 \text{ K}$ – начальная температура океана, $\Delta T = 1 \text{ K}$ – изменение температуры. Для воды $E/k \approx 4900 \text{ K}$, в результате предполагаемое увеличение равновесной концентрации H_2O в атмосфере составляет примерно 6%. Что не могло не отразиться на

переносе в атмосфере количества скрытой теплоты испарения и возможном увеличении общего количества осадков в целом по планете.

Такие признаки как: высокая скорость накопления ключевых парниковых газов в атмосфере (CO_2 и CH_4) за последние примерно 150 лет и их аномально высокая концентрация в современной атмосфере Земли в сравнении с данными за последние 800 тыс. лет указывают на возможность антропогенного характера современных процессов. Вполне вероятно, что аномально быстрый рост концентрации парниковых газов в атмосфере и повышение температуры воздуха за последние 100-150 лет, являются следствием крупномасштабной аграрной и индустриальной деятельности человека. Следствием этой деятельности стало размыкание углеродного цикла и накопление CO_2 в атмосфере [Горшков, 1995; Kondratyev et al., 2003]. Рост температуры поверхности, в свою очередь, способствует увеличению эмиссии углекислого газа из таких резервуаров как океан и карбонаты земной коры, где его запасы огромны и в принципе достаточны для создания давления в десятках атмосфер, практически как на Венере. Также с увеличением температуры поверхности возрастает вероятность выхода большого количества CH_4 в атмосферу из болот Западной Сибири, тающей многолетней мерзлоты и метангидратов. Из-за положительной обратной связи имеется вероятность аномально быстрой эмиссии огромного количества метана из вышеперечисленных резервуаров в атмосферу, что соответственно приведет к значительному возрастанию парникового эффекта. Этот вероятный сценарий эмиссии метана в литературе называют «метановой бомбой» [Голицын и Гинзбург, 2007]. В этой работе обсуждается сценарий быстрого в климатическом смысле потепления в раннем палеоцене, который был обнаружен в начале 90-х годов XX века. Он получил название Paleocene-Eocene Thermal Maximum (PETM). Отмечается, что, во-первых, с учетом разных молекулярных весов и поглощающих свойств CO_2 и CH_4 для достижения феномена PETM за счет роста концентрации CH_4 потребуется в 6 раз меньше углерода, чем за счет CO_2 , и, соответственно, нужен значительно меньший вынос углерода из недр Земли в атмосферу, чем при потеплении за счет углекислого газа. Во-вторых, парниковый эффект увеличения содержания CO_2 и CH_4 существенно усиливается положительной обратной связью изменения гидрологического цикла на поверхности и в атмосфере Земли, связанного с увеличением содержания водяного пара с ростом температуры по закону Клайперона-Клаузиуса.

Таким образом растущий парниковый эффект на Земле и его мониторинг становится важной научной проблемой современности. Наряду с мониторингом, основным инструментом для теоретического изучения климатической системы планеты и прогнозирования изменений климата в будущем является численное моделирование процессов тепло- и массообмена в системе «атмосфера-поверхность» в рамках 3D моделей общей циркуляции атмосферы [Мохов с соавт., 2006]. Центральным направлением современного развития моделей общей циркуляции атмосферы является более детальное описание всех физических процессов, происходящих в атмосфере и океане на как можно более мелкой координатной сетке, включая взаимодействие с биотой и учет рельефа поверхности. Некоторые современные модели учитывают изотопное разделение водяного пара при фазовых превращениях, в которых отношение $\text{HDO}/\text{H}_2\text{O}$ является трассером «силы гидрологического цикла» [Schmidt et al., 2007; Randall et al., 2007]. Поле величины этого отношения для газовой фазы, определённое по земному шару, отражает предысторию формирования воздушных масс (количество циклов испарения и конденсации) и характеризует режим переноса скрытого тепла в атмосфере от экватора к полюсам. Однако, несмотря на детальный учет всех процессов тепломассопереноса в системе «атмосфера – поверхность», современные 3D модели все же имеют один принципиальный недостаток. Радиационный блок этих моделей, характеризующий перенос теплового излучения в молекулярной атмосфере, включает параметризацию только основных колебательных полос поглощения парниковых газов и не учитывает горячие полосы, коэффициент поглощения в которых имеет экспоненциальную температурную зависимость. В результате, при моделировании термического режима системы «атмосфера-поверхность Земли» не учитывается влияние этого экспоненциального механизма положительной обратной связи, который может приводить к пороговым особенностям в парниковом эффекте.

В связи с проблемой аномально быстрого роста концентраций углекислого газа и метана в атмосфере в настоящее время и наличием огромного количества этих газов, депонированных в различных земных резервуарах, актуальным становится вопрос о глобальной устойчивости современного термического режима поверхности Земли при условии потенциально сценария аномально быстрого (в масштабе изменения климатической системы) накопления парниковых газов в атмосфере. На первоначальном этапе такого рода исследований для физически адекватного описания теплового баланса поверхности Земли в широком диапазоне температур (выше современной на ~100 и более градусов Цельсия, как например на Венере), целесообразна разработка относительно простых 1D (по вертикали) радиационных моделей, учитывающих поглощение теплового ИК-излучения в горячих колебательно-вращательных полосах парниковых газов.

С целью мониторинга термодинамического состояния и состава атмосферы Земли давно и активно разрабатываются технологии дистанционного инфракрасного зондирования атмосферы [Smith et al., 1979; Godlevskii et al., 1990; Smith et al., 1991; Zhiliba, 1991; Зуев и Зуев, 1992; Gorbachev and Zhiliba, 2000; Smith et al., 2005; Sobrino, 2005].

Прогресс в развитии инфракрасной техники и появление в 1990-х годах спутниковых Фурье-спектрометров достаточно высокого разрешения (до 0.05 см^{-1}) и Фурье-спектрометров наземного базирования с разрешением до 0.001 см^{-1} позволяет иметь десятки-сотни тысяч спектральных каналов в тепловой инфракрасной области. В результате такого прогресса существенно повысилась информативность натуральных спектров излучения и пропускания атмосферы. Обратная задача по определению параметров атмосферы из ее ИК-спектров высокого разрешения стала существенно переопределенной. Произошли качественные изменения в методах обработки и интерпретации спутниковых данных. Успехи в области прикладной атмосферной инфракрасной спектроскопии, создание баз данных детальной спектроскопической информации по атмосферным газам (NITRAN [Rothman et al., 2009], GEISA [Jaquinet-Husson et al., 2008], накопление априорной информации по профилям температуры и концентраций оптически активных газовых составляющих атмосферы в базе TIGR [Chevallier et al., 2000], информационной системе BADC [<http://badc.nerc.ac.uk>] и др. способствуют прогрессу в дистанционном зондировании парниковых газов, таких как: H_2O , CO , O_3 , CH_4 , N_2O , CO_2 и других, включая некоторые их изотопомеры. Наличие системы многолетнего мониторинга управляющих параметров климатической системы Земли позволит в перспективе получать новые знания о физике теплового баланса нашей планеты, выявить характерные тренды в процессе глобального потепления и их количественные характеристики.

Болотная экосистема Западной Сибири - значительный источник выбросов метана на планете

Метан – это сильный парниковый газ. Он поступает в атмосферу из различных источников. Это естественные источники (заболоченные земли, разломы земной коры) и антропогенные источники (сельское хозяйство, виды деятельности, связанные с добычей и транспортировкой природного газа, нефти, угля и мусорные свалки) [Яговкина и др., 2003]. Метан удаляется из атмосферы в результате химических реакций, главным образом при взаимодействии с радикалом OH . Систематические измерения концентрации CH_4 в приземном слое атмосферы проводятся с 1983 г., а данные о концентрациях в атмосфере в более ранние периоды доступны по результатам исследований воздуха, извлеченного из кернов льда и слоев фирна [Baldini et al., 2002]. Основные вклады в глобальный баланс метана качественно определены, в то же время на сегодняшний день существуют трудности в надежном количественном определении темпов выброса из разнообразных биосферных и антропогенных источников. Это препятствует прогнозированию концентраций CH_4 в атмосфере и его вклада в радиационное воздействие на климат в будущем для любого заданного сценария антропогенных выбросов.

Роль метана в климатических процессах исключительно велика. В настоящее время насущной задачей для многих регионов земного шара, и в том числе для России, являются инвентаризация существующих источников метана, выявление и прогнозирование появления новых источников. В России более детальному исследованию следует подвергнуть те источники метана, мощность которых определена с недостаточной точностью. Прежде всего, это болота, и особенно обширные болота Западной Сибири. Западно-Сибирская равнина, занимающая площадь около $2\,745\,000 \text{ км}^2$, по своим природным условиям является уникальным районом земного шара. Главной отличительной особенностью равнины является ее исключительно высокая заболоченность, обусловленная климатическими и орографическими условиями. Средняя заболоченность ее территории составляет около 50%, а отдельных районов (Сургутское Полесье, Васюганье, водосборы рек Лямина, Пима, Агана и др.) — до 70-75%. Наличие среди болот бесчисленного множества озер создает своеобразный болотно-озерный ландшафт на значительной части территории Западной Сибири. Метан в болотах скапливался на протяжении тысяч лет. В зоне мерзлоты существует сезонно-оттаивающий деятельный слой, в котором при анаэробных условиях метан образуется и выделяется в атмосферу. Ниже этого слоя, при отрицательных температурах, законсервирован древний метан, его содержание не меняется со временем, поскольку при отрицательных температурах метаногенез практически отсутствует.

Запасы метана в сибирской мерзлоте огромны: по оценкам в Западной Сибири сосредоточена четверть мирового объема метана – около 70 млрд. тонн. Субарктическая зона болотной экосистемы западной Сибири наиболее чувствительна к росту приземной температуры воздуха, что инициирует процесс таяния вечной мерзлоты. Исследование воздействия глобального потепления на углеродный баланс арктической и субарктической болотной экосистем очень важно вследствие ожидаемого

масштабного размораживания торфяных слоев, в которых депонировано огромное количество органического углерода. Размораживание торфяников может привести к существенному возрастанию эмиссии метана из болот, а также геологического метана обширной субарктической зоны Западной Сибири. Как уже отмечалось ранее, метан гораздо более сильный парниковый газ, чем диоксид углерода, поэтому таяние болот – не просто свидетельство глобального потепления, но и возможная угроза резкого увеличения парникового эффекта. Температура на Земле растет быстрее всего в субарктической зоне – за последние около 100 лет среднегодовое потепление там составило около 3 градусов. Из-за того, что эта территория не покрыта густой растительностью, поверхность нагревается сильнее, чем в других местах и таяние мерзлоты растет с каждым годом.

Поэтому выбор в качестве объекта исследования эмиссии парниковых газов в атмосферу региона Западной Сибири (60-70° с.ш., 60-95° в.д.), содержащего огромное количество болот, а так же и мерзлоты с объектами комплекса добычи нефти и газа, представляется чрезвычайно важным. Основная задача исследования – это количественная оценка сезонных вариаций метана в атмосфере Западной Сибири, определение мощности источников и стоков метана и темпов выброса его из болотной экосистемы и зоны многолетней мерзлоты. Механизмы, формирующие сток и производство метана и углекислого газа в болотной экосистеме и зоне вечной мерзлоты изучаются в Югорском государственном университете (ЮГУ), на полевой научной станции Мухрино. Станция Мухрино вместе с научно-образовательным комплексом-стационаром «Шапша» (в пос. Шапша, 25 км восточнее г. Ханты-Мансийск) и экспериментальной площадкой в региональном парке Нумто включена в международную сеть SCANNET. В комплексе с Фурье-обсерваторией это сформирует программу мониторинга динамики парниковых газов в атмосфере, как на макроскопическом уровне спутникового зондирования, так и на микроскопическом уровне в контексте эволюции источников и стоков метана на тестовых высоко заболоченных участках и ландшафтах с многолетней мерзлотой. Переходные процессы в динамике эмиссии метана запланировано изучать на экспериментальной площадке «Нумто региональный парк» (63.7° с.ш., 70.9° в.д.) (Nymto Regional park). Этот участок перспективен для моделирования эволюции источников и стоков метана в атмосферу при таянии мерзлоты болотной экосистемы [Жилиба и др., 1996].

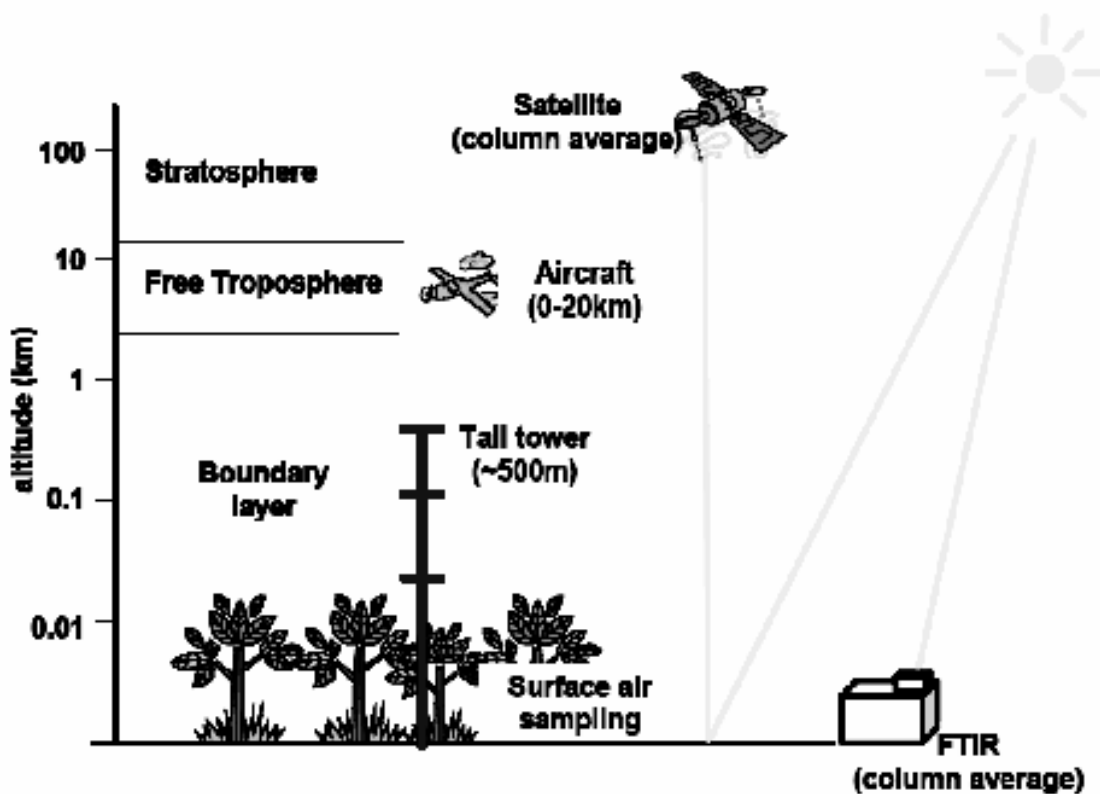


Рис. 2. Общая схема инфракрасного зондирования атмосферы со спутников и наземными спектрометрами и средства измерения *in situ* пробоотборными методами.

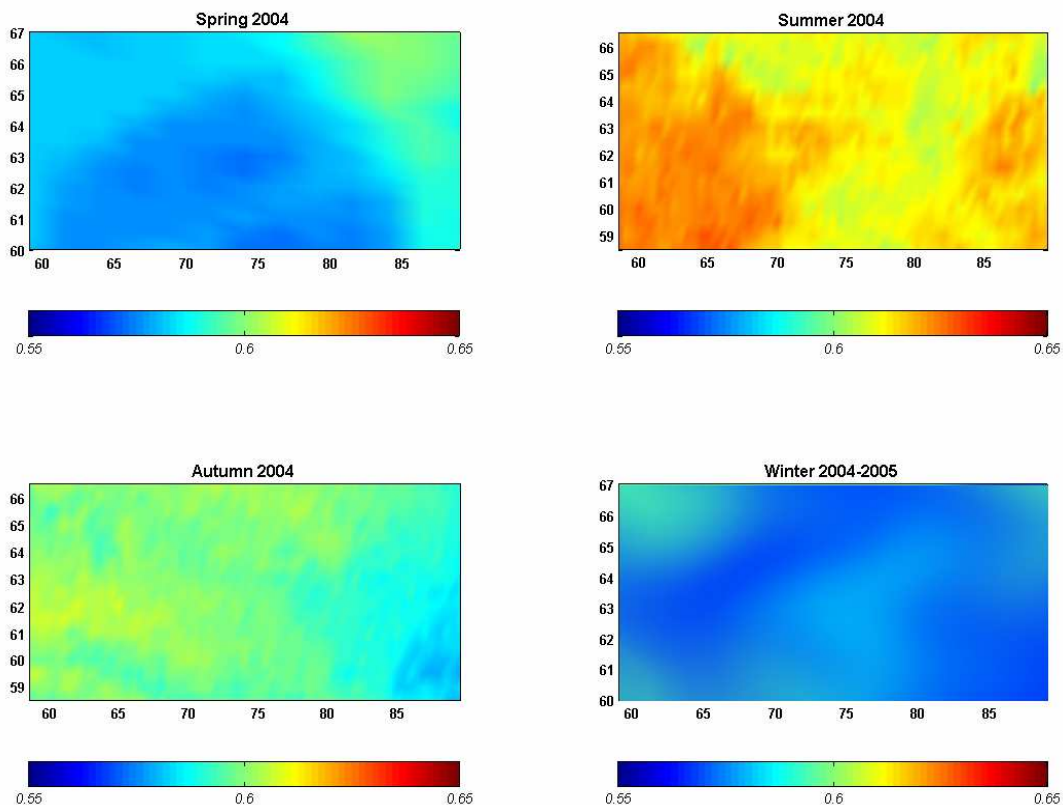


Рис. 3. Карты сезонного содержания метана в атмосферном столбе [моль/м²] над районом Западной Сибири (по вертикальной оси – широта: 59-67° с.ш.; по горизонтальной оси – долгота: 60-90° в.д.), полученные из данных AIRS/AQUA в 2004 г.

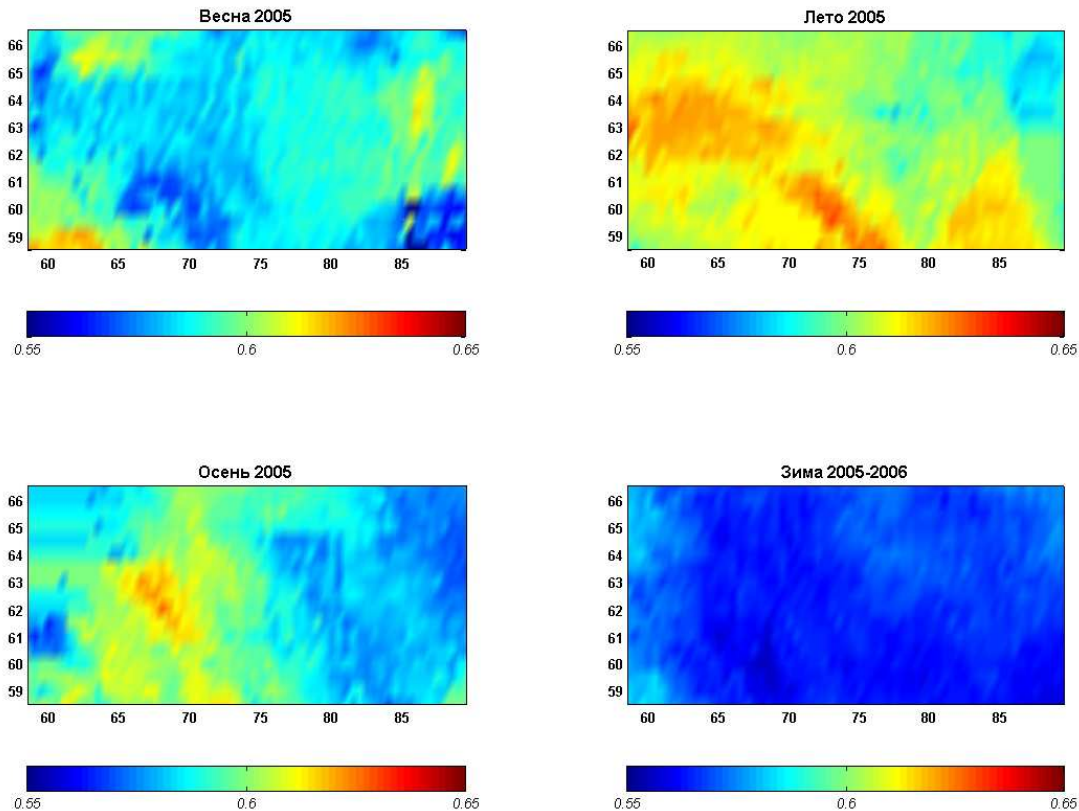


Рис. 4. Карты сезонного содержания метана в атмосферном столбе [моль/м²] над районом Западной Сибири (по вертикальной оси – широта: 59-67° с.ш.; по горизонтальной оси – долгота: 60-90° в.д.), полученные из данных AIRS/AQUA в 2005 г.

Мониторинг метана и других парниковых газов в атмосфере. Обратная задача.

В настоящее время на полярных орбитах действуют несколько подходящих для задач мониторинга парниковых газов спутников, оснащенных ИК спектрометрами высокого разрешения, такие как TES [Beer et al., 2001] на спутнике AURA (NASA, США), AIRS [Parkinson, 2003] на спутнике AQUA (NASA, США), SCIAMACHY [Burrows et al., 1995] на спутнике ENVISAT (ESA), IASI [Javelle, 1994] на спутнике METOP-A (ESA), TANSO-FTS [<http://www.gosat.nies.go.jp>] на спутнике GOSAT (JAXA, Япония). Регистрируемые ими инфракрасные спектры атмосферы несут информацию о содержании различных парниковых газов в атмосфере, включая CH_4 .

Для успешного решения обратной задачи по извлечению вертикальных профилей и полного содержания в атмосферном столбе парниковых газов из спутниковых спектров необходимо располагать всей доступной априорной информацией о возможных вертикальных распределениях искомым газам, полном содержании в столбе или хотя бы приземных концентрациях. Поэтому важной составляющей глобального спутникового зондирования являются независимые прямые измерения в подспутниковых точках, как на поверхности Земли, так и на самолетах. Для определения искомым параметров атмосферы как из спектров теплового излучения самой атмосферы и подстилающей поверхности, так и спектров пропускания атмосферой солнечного ИК излучения необходимо решать обратную задачу. Прямую и обратную задачи можно записать в виде [Rodgers, 2000] :

$$\mathbf{y} = F(\mathbf{x}, \mathbf{b}) + \varepsilon_y, \quad \mathbf{x} = F^{-1}(\mathbf{y}, \mathbf{b}) + \varepsilon_x, \quad (2)$$

где \mathbf{y} – вектор, состоящий из измеряемых спектрометром m компонент, \mathbf{x} – вектор n искомым атмосферных параметров, подлежащих определению, \mathbf{b} – параметры модели (считаются известными), ε_y – измерительный шум спектрометра, F – прямая модель (в данном случае уравнение переноса теплового излучения в атмосфере), F^{-1} – обратная модель, которая в общем случае может быть задана лишь алгоритмически. Практическая реализация решения обратной задачи требует, как правило, наличия обширной базы априорной информации об искомым профилям, полученной с использованием прямых радиозондовых, самолетных и других измерений. В качестве вектора параметров \mathbf{b} могут выступать высотные профили тех атмосферных параметров, которые в данном восстановлении считаются известными и полагаются фиксированными (например, профиль CO_2 при восстановлении профилей температуры и влажности). Разработанные в литературе методы решения обратной задачи рассматривают данную задачу как некорректную и применяют различные методы регуляризации, использующие дополнительную априорную информацию о возможном решении. Многообразие разработанных методов обращения в (2) условно можно свести к двум типам:

а) метод статистической регуляризации [Rodgers, 2000];

б) методы регуляризации по Тихонову [Тихонов и Арсенин, 1986; Васин и Агеев, 1993].

Методы решения задач атмосферной оптики, описанные в литературе, как правило, основываются на минимизации определенного вида целевой функции. Для минимизации используются, обычно либо метод Ньютона, либо метод Левенберга-Марквардта, который представляет собой сочетание метода Ньютона и метода градиентного спуска. Размерность задачи можно уменьшить, если представить атмосферные профили в виде разложения по собственным векторам корреляционной матрицы априорных профилей \mathbf{S}_x [Smith and Woolf, 1976]:

$$\mathbf{x} = \sum_{i=1}^M c_i \mathbf{v}_i, \quad (3)$$

где \mathbf{v}_i – i -ый собственный вектор матрицы \mathbf{S}_x , а c_i – коэффициент разложения, M - число учитываемых слоев атмосферы. Ограничивая ряд (3) несколькими первыми членами и сводя задачу к нахождению коэффициентов разложения, можно понизить размерность задачи. Обрезание ряда (3) первыми членами аналогично поиску решения на множестве гладких функций, как это делается в случае регуляризации по Тихонову. Методы регуляризации изначально применялись для многоканальных спектрометрических с небольшим числом спектральных каналов, когда число неизвестных (число определяемых параметров) превышало количество уравнений задачи (число используемых спектральных каналов). В этом случае задача была изначально вырожденной (неоднозначной) и использование любой априорной информации об искомым параметрах было крайне необходимо. С появлением на орбите спектрометров высокого спектрального разрешения ($\sim 0.1 \text{ см}^{-1}$ и выше) обратная задача стала существенно переопределенной, т.е. количество информативных спектральных каналов (число уравнений), как

правило, на порядок-два превышает число искомым (неизвестных) параметров атмосферы. Поэтому в некоторых случаях стало возможным практически отказаться от регуляризации и для решения обратной задачи использовать минимизацию квадратичной невязки измеренных и расчетных спектров методом наименьших квадратов (МНК) с ограничениями, без привлечения дополнительной априорной информации об искомом решении [Грибанов с соавт., 1999; Griбанov et al., 2001]. Целевая функция, используемая в МНК Гаусса, выглядит как:

$$J(x) = \|F(x, b) - y\|_2^2. \quad (4)$$

Вычислительная трудность решения обратных задач для определения искомым профилей из инфракрасных спектров атмосферы высокого разрешения обусловлена большой размерностью обратной задачи: в пространстве измерений – число спектральных каналов, в пространстве решений – число узлов высотной сетки, умноженное на число восстанавливаемых вертикальных профилей. Практическая реализация алгоритмов решения таких обратных задач для массовой обработки спутниковых спектров требует значительных вычислительных (суперкомпьютерных) ресурсов и времени.

Пример карт горизонтального распределения средне-сезонного содержания метана за 2004–2006 гг., полученного по данным спектрометра AIRS в рамках проекта INTAS-CASUS, приведен на Рис. 3-5. Карты строились путем усреднения значений полного содержания метана в атмосферном столбе ($totalCH_4$), восстановленных из доступных спектров AIRS чистого неба за определенный сезон [Toptygin et al., 2005; Грибанов с соавт., 2007].

Содержание метана над исследуемым районом Западной Сибири можно представить в виде суммы:

$$totalCH_4 = t_{BKGR} + t_{EMIS} + t_{ANTR}, \quad (5)$$

где t_{BKGR} – фоновое содержание в атмосфере; t_{EMIS} – вклад природной эмиссии болот; t_{ANTR} – антропогенный вклад. Учтено, что антропогенный и природный метан различен по изотопному составу.

Фоновое слагаемое t_{BKGR} – это метан, всегда присутствующий в атмосфере даже если нет антропогенных источников и отсутствует эмиссия с поверхности болот. Его содержание медленно меняется со временем и равномерно перемешано в горизонтальном направлении. Природная эмиссия t_{EMIS} – обусловлена выделением метана в микробиологических процессах, происходящих в верхнем слое почвенного покрова болот (торф). Интенсивность выделения зависит от температуры поверхности, горизонтальное распределение определяется географическим расположением заболоченных территорий. Возможна также эмиссия геологического метана через разломы в летний период. Антропогенный вклад t_{ANTR} обусловлен наличием в исследуемом районе объектов комплекса добычи нефти и газа. Вдоль магистральных трубопроводов перекачки природного газа расположены компрессорные станции, примерно каждые 150–300 км, которые используют для работы тот же газ. В нефтепроводах избыточное давление попутного газа сбрасывается через клапана – факельные установки по сжиганию попутного газа. Технологический режим сгорания газа в двигателях компрессоров и газа в факелах таков, что в атмосферу постоянно выбрасывается часть метана [Хитрин, 1960].

Для валидации получаемых спутниковых данных используются синхронизированные по времени подспутниковые измерения. Для этих целей создается международная сеть наземных FTIR (Fourier Transform InfraRed) станций TCCON (Total Carbon Observing Network). Карта расположения на земном шаре Фурье-спектрометров наземного базирования, входящих в состав международной сети TCCON представлена на Рис.6. Европейский сегмент международной сети TCCON более детально показан на Рис. 7. На Рис. 8 приведена принципиальная оптическая схема FTIR наземного базирования.

Типичный образец спектра в диапазоне 2000-14000 cm^{-1} с разрешением 0.0035 cm^{-1} , измеренный в солнечные безветренные дни за период с сентября 2009 г. по сентябрь 2010 г. на Уральской Атмосферной Фурье-Станции приведен ниже: Рис. 9. УАФС имеет координаты 59.546 с.ш.; 57.036 в.д., высота около 300 м над уровнем моря, расположена в лесу примерно в 80 км на северо-запад от г. Екатеринбурга вблизи деревни Коуровка и включает в себя автоматизированный Фурье-спектрометр Bruker IFS 125M, сопряженный с солнечным трэкером A547N. На Рис. 10 приведены отдельные участки спектров, содержащие информацию о полосах поглощения ключевых парниковых газов и некоторых их изотопмеров. Рис. 11 и 12 демонстрируют результаты решения обратных задач по определению

концентрации парниковых газов CH_4 и CO_2 в атмосферном столбе из ИК-спектров пропускания атмосферы высокого разрешения, измеренных на УАФС.

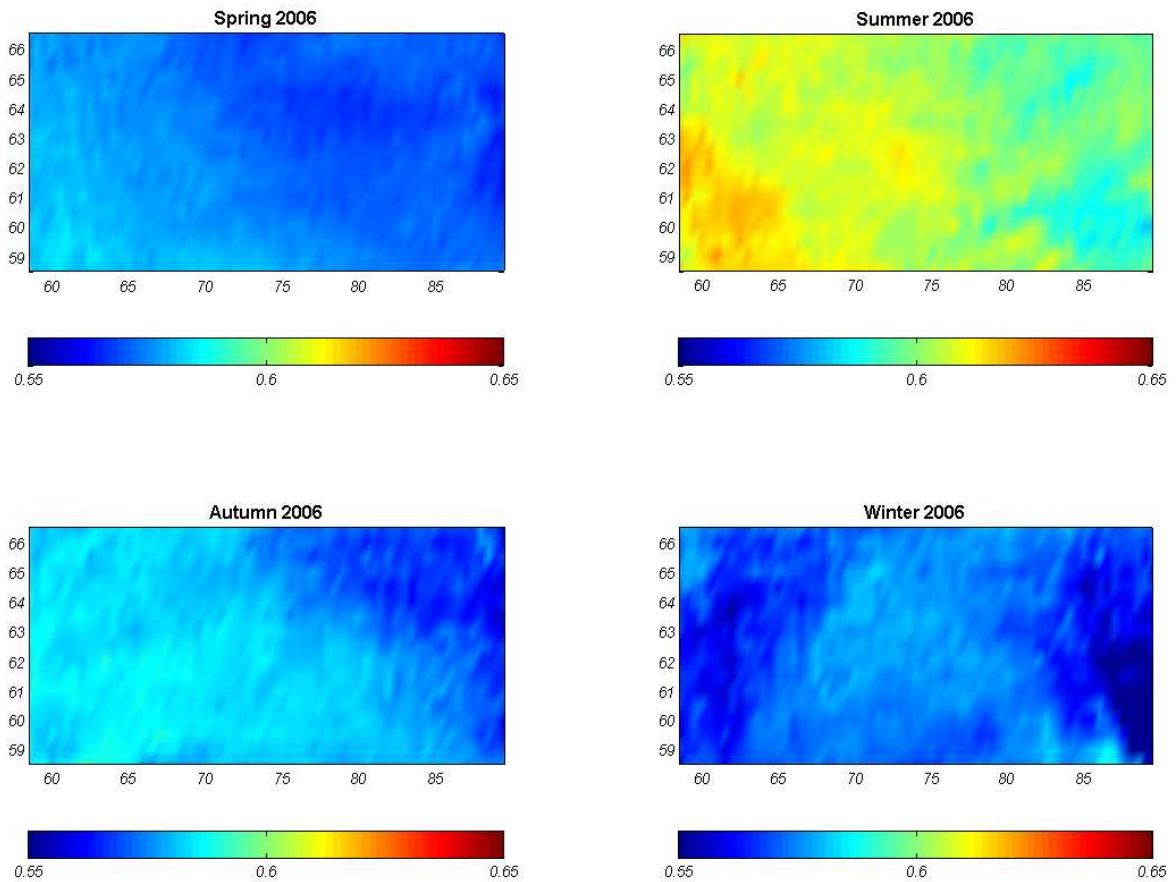


Рис. 5. Карты сезонного содержания метана в атмосферном столбе [$\text{моль}/\text{м}^2$] над районом Западной Сибири (по вертикальной оси – широта: 59-67° с.ш.; по горизонтальной оси – долгота: 60-90° в.д.), полученные из данных AIRS/AQUA в 2006 г.

TCCON Site Map



Рис.6. Расположение наземных ИК Фурье-обсерваторий международной сети TCCON по состоянию на 2010 г.
Примечание: Звездочкой отмечена планируемая ИК Фурье-обсерватория в районе г. Ханты-Мансийск (п. Шапша).

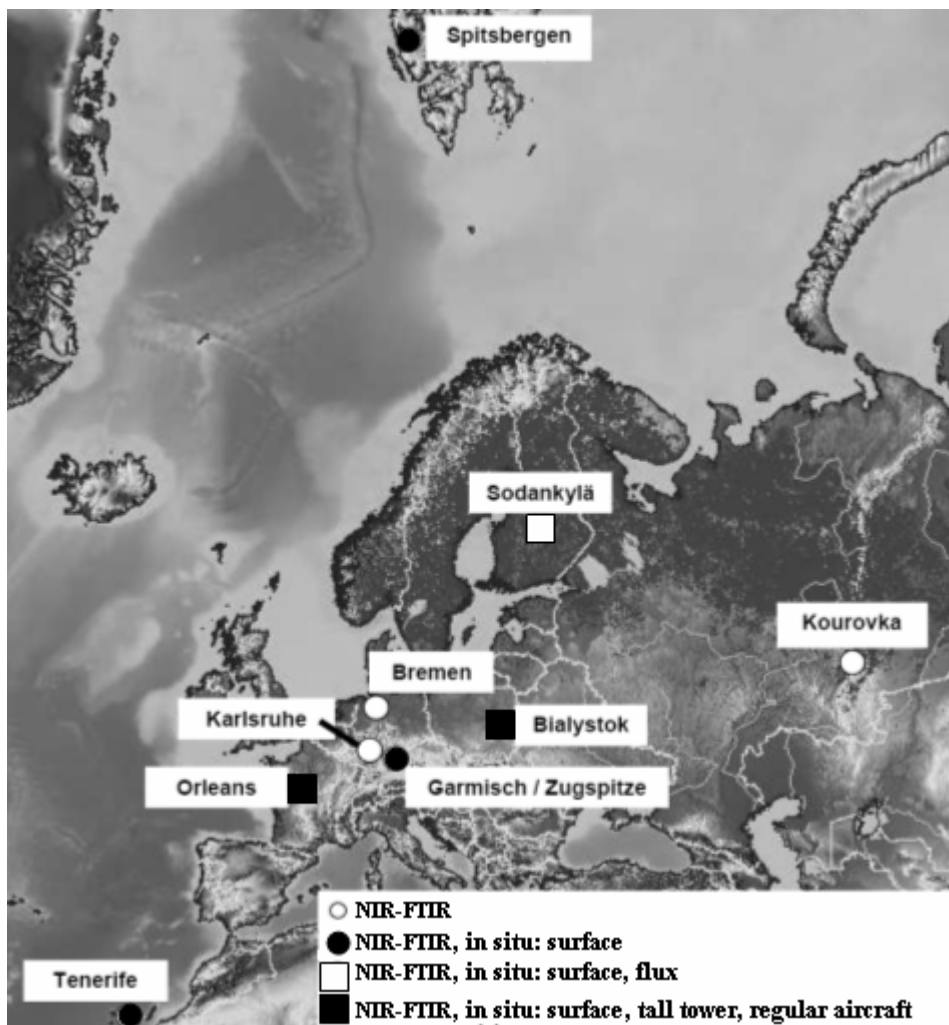


Рис.7. Европейский сегмент международной сети TCCON для мониторинга парниковых газов и валидации спутниковых данных.

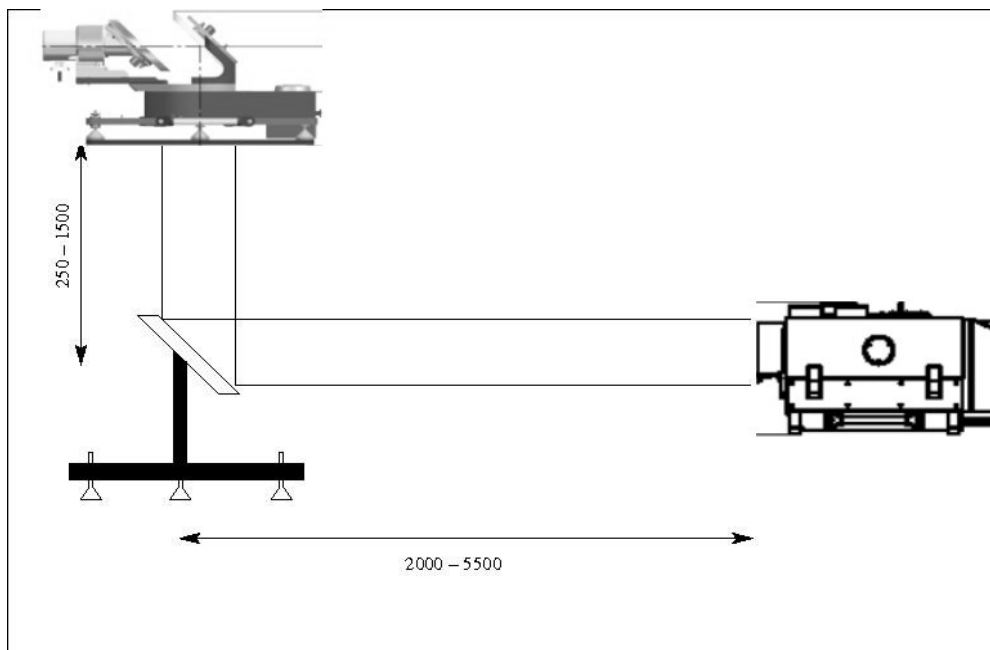


Рис.8. Принципиальная схема приема солнечного излучения солнечным трэкером и транспортировка его к входному устройству Фурье-спектрометра. Расстояния указаны в мм.

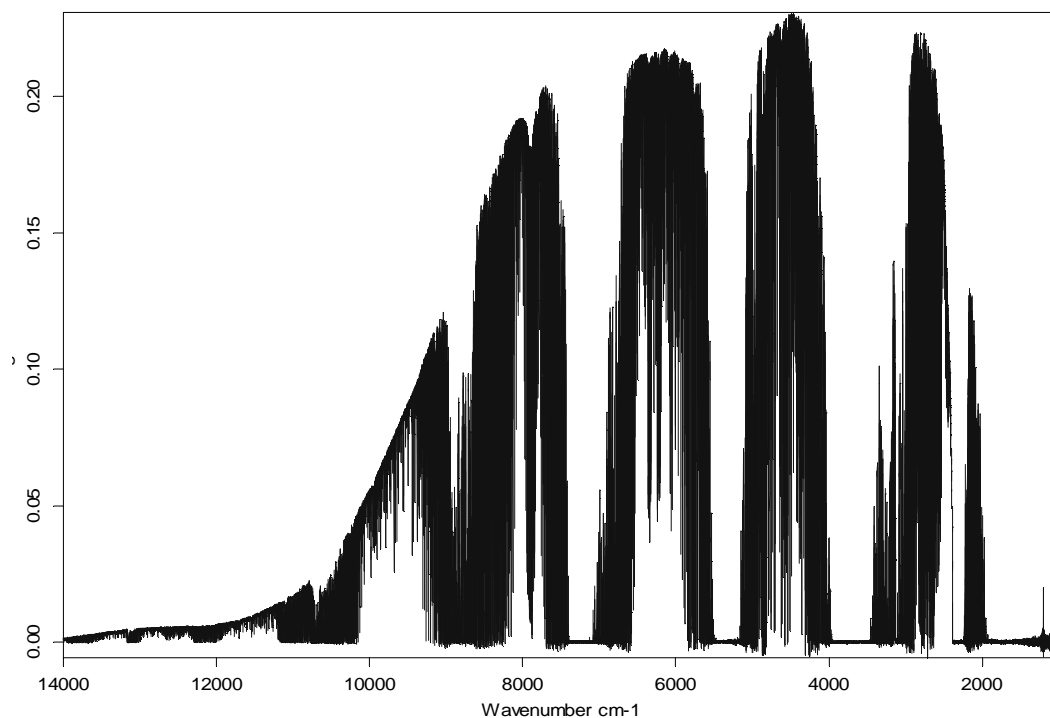


Рис. 9. Образец спектра высокого разрешения в диапазоне $2000-14000\text{ см}^{-1}$, регистрируемый в безоблачной атмосфере фонового района на УАФС (Коуровка).

Примечание: По вертикали спектр мощности сигнала в относительных единицах. По горизонтали волновые числа.

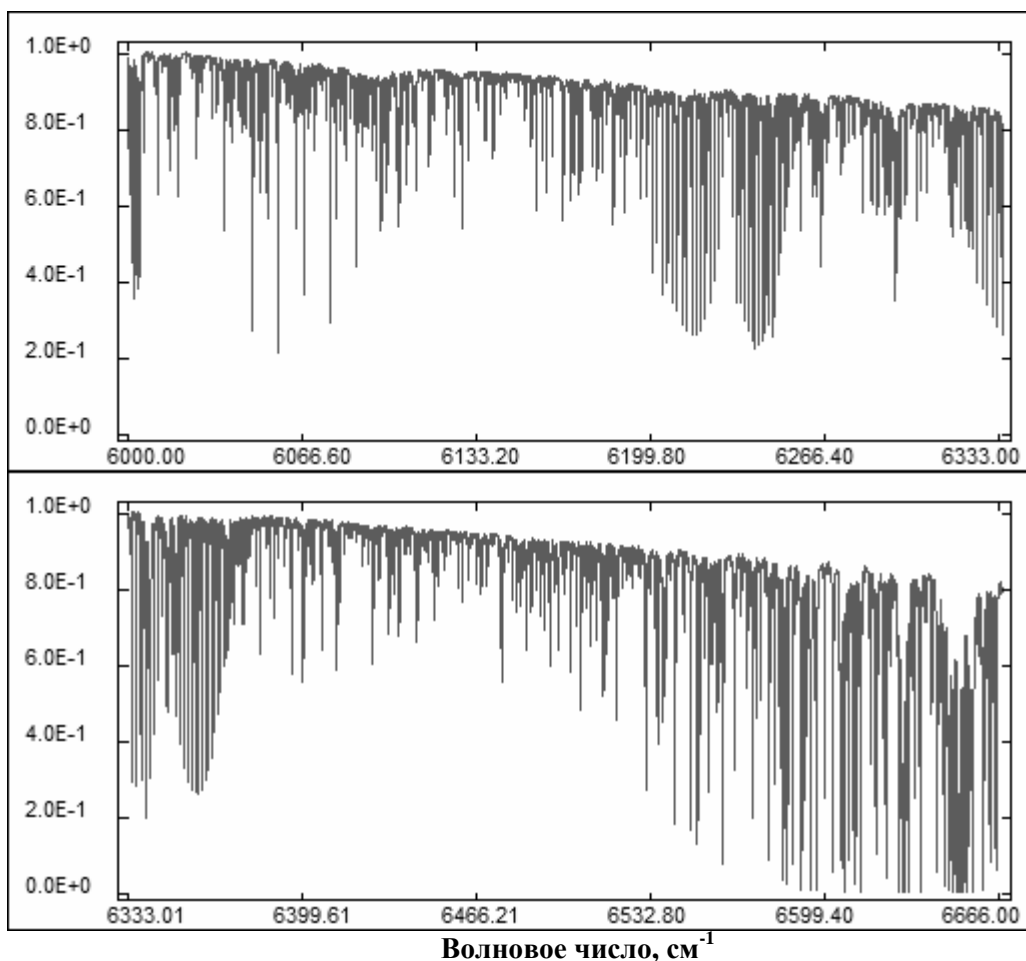


Рис. 10. Более детальные фрагменты наблюдаемого спектра пропускания атмосферы в полосах поглощения CO_2 и CH_4 интервалах $6000 - 6333\text{ см}^{-1}$ (верхняя панель) и $6333 - 6666\text{ см}^{-1}$ (нижняя панель).

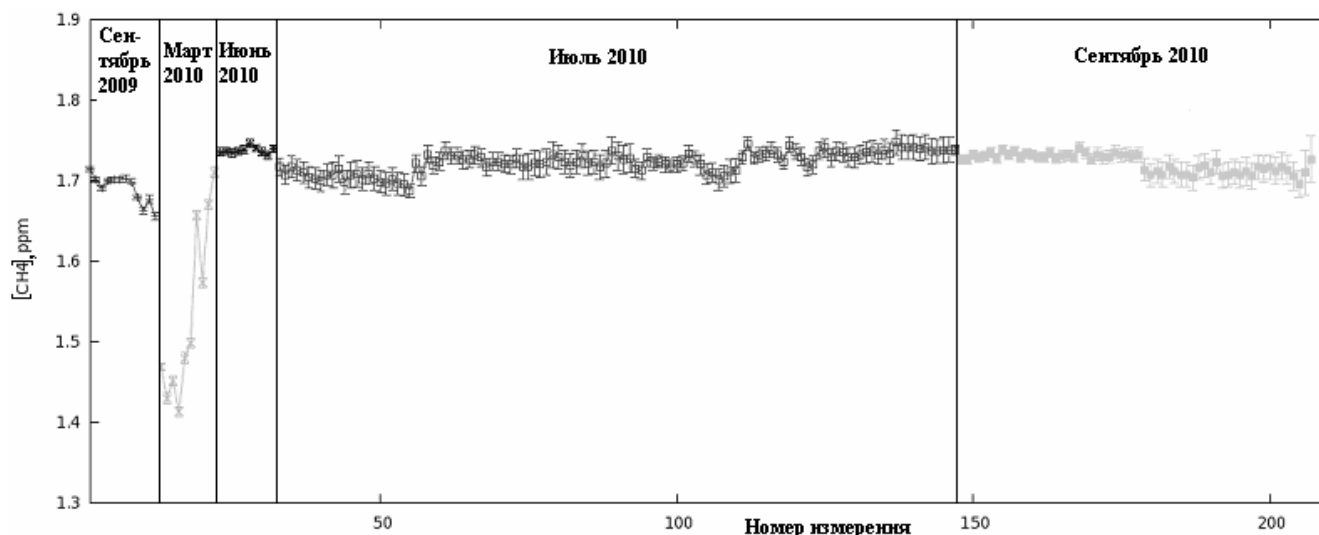


Рис. 11. Значение средней концентрации метана в атмосферном столбе над Средним Уралом (УАФС Коуровка). Данные из измеренных спектров пропускания в диапазоне $4100-8100\text{ см}^{-1}$ в солнечные безветренные дни (сентябрь 2009 г., июнь, июль и сентябрь 2010 г.) с низкой концентрацией аэрозоля в атмосфере. Показана также ошибка решения обратной задачи. Для сравнения приведены результаты, получаемые из спектров, соответствующих состояниям аэрозольно-замутненной атмосферы и значительным вариациям содержания аэрозоля во время измерений (сентябрь 2009 г. и март 2010 г.).

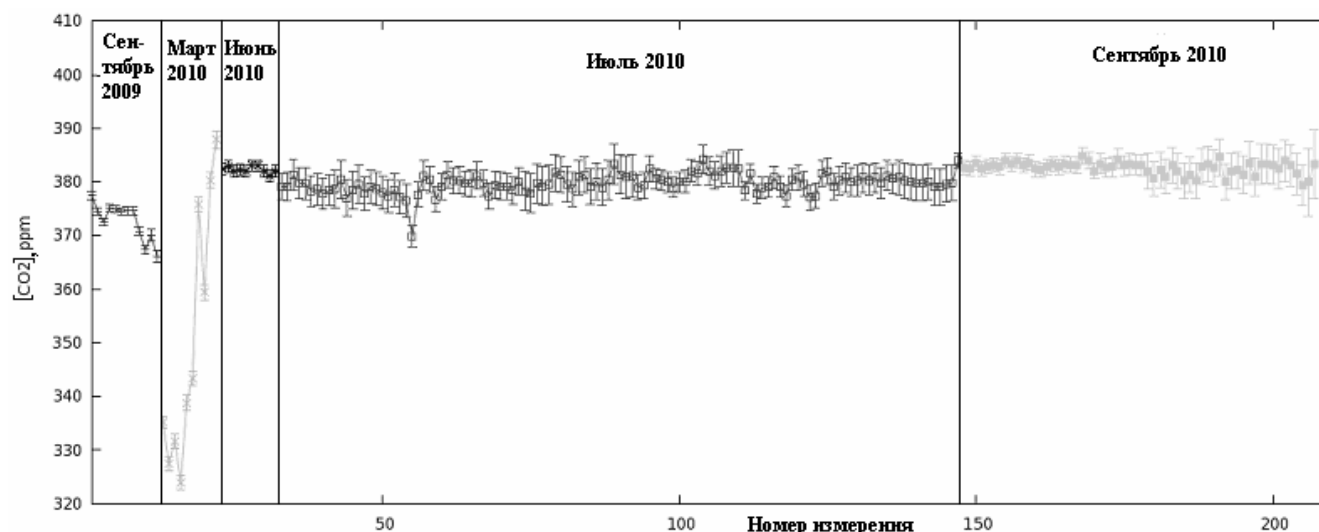


Рис. 12. Значение средней концентрации углекислого газа (CO_2) в атмосферном столбе над Средним Уралом (УАФС Коуровка). Данные из измеренных спектров пропускания в диапазоне $4100-8100\text{ см}^{-1}$ в солнечные безветренные дни (сентябрь 2009 г., июнь и сентябрь 2010 г.) с низкой концентрацией аэрозоля в атмосфере. Показана также ошибка решения обратной задачи. Для сравнения приведены результаты, получаемые из спектров, соответствующих состояниям аэрозольно-замутненной атмосферы и значительным вариациям содержания аэрозоля во время измерений (сентябрь 2009 г. и март 2010 г.).

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Обсуждается актуальная проблема количественной оценки потенциально возможного взрывного роста эмиссии метана из резервуаров высокозаболоченной таежной зоны Западной Сибири и примыкающей к ней субарктической зоны многолетней мерзлоты. Подчеркнуто, что качественная и количественная оценки близости данной экосистемы к состоянию катастрофы, т.е. внезапному и аномально высокому выделению метана в атмосферу («метановая бомба»), требует непрерывного мониторинга как на тестовых участках (микромасштаб), в качестве которых запускается международный полевой комплекс Шаша-Мухрино-Нумто, так и на макроскопическом масштабе всей территории Западной Сибири и примыкающей к ней зоны многолетней мерзлоты. Как один из основных **количественных** элементов в оценках сценариев скачкообразного изменения климата в данном обзоре рассмотрены методы спутникового мониторинга сезонных вариаций содержания ключевых парниковых газов в атмосфере Западной Сибири. В настоящее время на полярных орбитах действуют пять подходящих для таких задач спутников, оснащенных ИК спектрометрами высокого разрешения, такие

как TES (Tropospheric Emission Spectrometer) на спутнике AURA (NASA, США), AIRS (Atmospheric Infrared Sounder) на спутнике AQUA (NASA, США), SCIAMACHY (SCanning Imaging Absorption SpectroMeter) на спутнике ENVISAT (ESA), IASI на спутнике МЕТОР-А (ESA), TANSO-FTS на спутнике GOSAT (JAXA, Япония). Регистрируемые ими инфракрасные спектры атмосферы содержат информацию о концентрации различных парниковых газов в атмосфере, включая CH₄. Для целей валидации получаемых спутниковых данных, т.е. синхронизированных по времени подспутниковых измерениях, обоснована необходимость создания Фурье-обсерватории в международном научно-образовательном центре Шапша-Мухрино и интегрирование ее в международную сеть наземных FTIR (Fourier Transform InfraRed) станций TCCON (Total Carbon Observing Network).

Наличие разветвленной системы многолетнего мониторинга термодинамических параметров атмосферы, концентрации парниковых газов, параметров водного цикла и др. позволит в перспективе получать новые знания о физике теплового баланса нашей планеты, выявить характерные тренды в процессе глобального потепления и определить их количественные характеристики.

Вопросы динамики выделения метана в атмосферу в условиях эволюции состояния резервуаров болотной экосистемы и зоны многолетней мерзлоты Западной Сибири и Субарктики в результате тренда роста средней годовой и высоких колебаний сезонной температуры приземной атмосферы будут рассмотрены отдельно.

ЛИТЕРАТУРА

- Васин В.В., Агеев А.Л. 1993. Некорректные задачи с априорной информацией. Екатеринбург: УИФ "Наука". 262 с.
- Голицын Г.С., Гинзбург А.С. 2007. Оценки возможности "быстрого" метанового потепления 55 млн. лет назад // Доклады РАН. Т. 413. №6. С. 816-819.
- Горшков В.Г. 1995. Физические и биологические основы устойчивости жизни. М. 470 С.
- Грибанов, К.Г., В.И. Захаров, С.А. Ташкун. 1999. Пакет программ FIRE-ARMS и его применение в задачах пассивного ИК-зондирования атмосферы // Оптика атмосферы и океана. Т. 12. №4. С. 372–378.
- Грибанов К.Г., Имасу Р., Топтыгин А.Ю., Блойтен В., Наумов А.В., Захаров В.И. 2007. Метод и результаты по определению метана в атмосфере Западной Сибири из данных сенсора AIRS // Оптика атмосферы и океана. Т. 20. №10. С. 881-886.
- Жилиба А.И., Кудинов А.Н., Тищенко А.П. 1996. Оценка близости экосистем к состоянию катастрофы // ТвГУ. Ученые записки. Т. 1. С. 25.
- Зуев В.Е., Зуев В.В. 1992. Дистанционное оптическое зондирование атмосферы. С-Пб.: Гидрометеоздат. 275 с.
- Мохов И.И., Елисеев А.В., Карпенко А.А. 2006. Чувствительность к антропогенным воздействиям глобальной климатической модели ИФА РАН с интерактивным углеродным циклом // Доклады РАН. Т. 407. № 3. С. 400-404.
- Тихонов А.Н., Арсенин В.Я. 1986. Методы решения некорректных задач. М.: Наука. 288 с.
- Хитрин Л.Н. 1960. Основы горения углеводородных топлив. М: Наука.
- Яговкина С.В., Кароль И.Л., Зубов В.А., Лагун В.Е., Решетников А.И., Розанов Е.В. 2003. Оценки потоков метана в атмосферу с территории газовых месторождений севера Западной Сибири с использованием трехмерной модели переноса // Метеорология и гидрология. № 4. С. 49–62.
- Baldini J.U., McDermott Frank, J. Fairchild Ian, Structure of the 8200-year cold event revealed by a speleothem trace element record // Science. 2002. № 5576. P. 2203–2206.
- Beer R., Glavich T.A., Rider T.M. 2001. Tropospheric emission spectrometer for Earth Observing System's Aura satellite // Applied Optics. V. 40. № 15. P. 2356.
- Burrows J.P., Hölzle E., Goede A.P.H., Visser H., Fricke W. 1995. SCIAMACHY- Scanning Imaging Absorption Spectrometer for Atmospheric Chartography // Acta Astronautica. V. 35. No. 7. P. 445.
- Chevallier F., Morcrette J.J., Chedin A., Cheruy F. 2000. TIGR-like atmospheric-profile databases for accurate radiative-flux computation // Quart. J. of the Roy. Met. Soc. V. 126. No. 563. P. 777-785. Part B.
- Godlevskii A.P., Gordov E.P., Zhiliba A.I., Sharin P.P. 1990. Doppler Lidar with CO₂ laser intracavity reception // Atmos. Oceanic Optics. V. 3. P. 34-39.
- Gorbachev V.N., Zhiliba A.I. 2000. Transfer formalism for optics problems // Journal of Physics A: Math. General. V. 33 . P. 3771-3782.
- Gribanov K.G., Zakharov V.I., Tashkun S.A., Tyuterev V.G. 2001. A new software tool for radiative transfer calculations and its application to IMG/ADEOS data // JQSRT. V. 68. № 4. P. 435-451.
- Jaquinet-Husson N., Scott N.A., Chedin A., Crepeau L., Armante R., Capelle V., Orphal J., Coustenis A., Boone C., Poulet-Crovisier N., Barbe A., Birk M., Brown L.R., Camy-Peyret C., Claveau C., Chance K., Christidis N., Clerbaux C., Coheur P.F., Dana V., Daumont L., De Backer-Barilly M.R., Di Lonardo G., Flaud J.M., Goldman A., Hamdouni A., Hess M., Hurley M.D., Jacquemart D., Kleiner I., Kopke P., Mandin J.Y., Massie S., Mikhailenko S., Nemtchinov V., Nikitin A., Newnham D., Perrin A., Perevalov V.I., Pinnock S., Regalia-Jarlot L., Rinsland C.P., Rublev A., Schreier F., Schult L., Smith K.M., Tashkun S.A., Teffo J.L., Toth R.A., Tyuterev V.I.G., Vander Auwera J., Varanasi P., Wagner G. 2008. The GEISA spectroscopic database: Current and future archive for Earth and planetary atmosphere studies // Journal of Quantitative Spectroscopy and Radiative Transfer. V. 109. No. 6. P. 1043-1059.
- Javelle P. 1994. IASI instrument overview // Procs. of the 5th Workshop on ASSFTS, Nov.30th - Dec.2nd, Tokyo, Japan. P. 1-20.
- Jouzel J., Masson-Delmotte V., Cattani O., Dreyfus G., Falourd, Hoffmann G., Minster B., Nouet J., Barnola J.M., Chappellaz J., Fischer H., Gallet J.C., Johnsen S., Leuenberger M., Loulergue L., Luethi D., Oerter H., Parrenin F., Raisbeck G., Raynaud D., Schilt A., Schwander J., Selmo E., Souchez R., Spahni R., Stauffer B., Steffensen J.P., Stenni B., Stocker T.F., Tison J.L., Werner M., Wolff I.E.W. 2007. Orbital and Millennial Antarctic Climate Variability over the Past 800,000 Years // Science. V. 317. No. 5839. P. 793-796.
- Kondratyev K.Ya., Krapivin V.F., Varotsos C.A. 2003. Global Carbon Cycle and Climate Change. Chichester, United Kingdom: Springer/PRAxis. P. 372.

Petit J.R., Jouzel J., Raynaud D., Barkov N.I., Barnola J.-M., Basile I., Bender M., Chappellaz J., Davis M., Delaygue G., Delmotte M., Kotlyakov V.M., Legrand M., Lipenkov V.Y., Lorius C., Pepin L., Ritz C., Saltzman E., Stievenard M. 1999. Climate and atmospheric history of the past 420,000 years from the Vostok ice core, Antarctica // *Nature*. V. 399. P. 429-436.

Parkinson C.L. 2003. Aqua: an Earth-Observing Satellite mission to examine water and other climate variables // *Geoscience and Remote Sensing, IEEE Transactions*. V. 41. № 2. P. 173-183.

Randall D.A., Wood R.A., Bony S., Colman R., Fichet F., Fyfe J., Kattsov V., Pitman A., Shukla J., Srinivasan J., Stouffer R.J., Sumi A., Taylor K.E. 2007. Climate Models and Their Evaluation // *Climate Change 2007: The Physical Science Basis. Contribution of Working Group I to the Fourth Assessment Report of the Intergovernmental Panel on Climate Change / Solomon S., Qin D., Manning M., Chen Z., Marquis M., Averyt K.B., Tignor M., Miller H.L. (eds.)*. Cambridge (United Kingdom), New York (NY, USA): Cambridge University Press. Also available at http://www.ipcc.ch/publications_and_data/ar4/wg1/en/ch8.html (дата обращения: 22.06.2011).

Rodgers C.D. 2000. Inverse methods for atmospheric sounding. Theory and practice. World Scientific. 206 p.

Rothman L.S., Gordon I.E., Barbe A., Chris Benner D., Bernath P.F., Birk M., Boudon V., Brown L.R., Campargue A., Champion J.-P., Chance K., Coudert L.H., Dana V., Devi V.M., Fally S., Flaud J.-M., Gamache R.R., Goldman A., Jacquemart D., Kleiner I., Lacombe N., Lafferty W.J., Mandin J.-Y., Massie S.T., Mikhailenko S.N., Miller C.E., Moazzen-Ahmadi N., Naumenko O.V., Nikitin A.V., Orphal J., Perevalov V.I., Perrin A., Predoi-Cross A., Rinsland C.P., Rotger M., Simeckova M., Smith M.A.H., Sung K., Tashkun S.A., Tennyson J., Toth R.A., Vandaele A.C., Vander Auwera J. 2009. The HITRAN 2008 molecular spectroscopic database // *JQSRT*. V. 110. P. 533-572. doi:10.1016/j.jqsrt.2009.02.013.

Schmidt G.A., Hoffmann G., Shindell D.T., Hu Y. 2005. Modeling atmospheric stable water isotopes and the potential for constraining cloud processes and stratosphere-troposphere water exchange // *J. Geophys. Res.* № 110. D21314. DOI:10.1029/2005JD005790.

Smith W.L., Revercomb H., Zhou D.K., Huang H.-L.A. 2005. Hyperspectral sounding: a revolutionary advance in atmospheric remote sensing // *SPIE*. V. 5655. P. 1-11.

Smith W.L., Woolf H.M. 1976. The Use of Eigenvectors of Statistical Covariance Matrices for Interpreting Satellite Sounding Radiometer Observations // *J. Atmospheric Sciences*. V. 33. № 7. P. 1127-1140.

Smith W.L., Woolf H.M., Hayden C.M., Wark D.Q., McMillin L.M. 1979. The TIROS-N operational vertical sounder // *Bull. Amer. Met. Soc.* V. 60. P. 1177-1187.

Smith W.L., Woolf H.M., Revercomb H. 1991. Linear simultaneous solution for temperature and absorbing constituent profiles from radiance spectra // *Applied Optics*. V. 30. № 9. P. 1117-1123.

Sobrino J.A. 2005. Land surface temperature retrieval from thermal infrared data: An assessment in the context of the Surface Processes and Ecosystem Changes Through Response Analysis (SPECTRA) mission // *J. Geophys. Res.* V. 110. D16103. DOI:10.1029/2004JD005588.

Toptygin A.Yu., Gribanov K.G., Imasu R., Bleuten W., Zakharov V.I. 2005. Seasonal methane content in atmosphere of the permafrost boundary zone in Western Siberia determined from IMG/ADEOS and AIRS/AQUA data // *SPIE*. V. 5655. P. 508-514.

Zhiliba A.I. 1991. Limiting sensitivity of absorption spectrometer // *Proceedings SPIE*. V. 1811: Highly Resolution Molecular Spectroscopy. P. 415-418.

GLOBAL CLIMATE CHANGE. IS “METHANE BOMB” SCENARIO SENSITIVE TO MELTING PERMAFROST OF WEST SIBERIA PEAT LAND?

Zhiliba A.I., Vandisheva G.A., Gribanov K.G., Zakharov V.I.

We consider how to quantify the methane concentration in the atmosphere over the large area of Western Siberia based on hyper-spectral remote sensing data. Is Methane bomb scenario (triggered methane gas emission as it was during Holocene) in evolution of pristine peat land and melting permafrost West Siberia and sub Arctic actual problem of the 21st century?

Terrestrial wetland ecosystems were the major source of methane into the atmosphere of Western Siberia during the Holocene. The actual role of pristine peat land in global carbon balance has not been quantified at this time. In particular the sub-arctic peat lands, as extensively present in Western Siberia, are white spaces in knowledge of carbon exchange with the atmosphere. Nevertheless, actual impact of the natural and anthropogenic sources on atmospheric methane over Western Siberia has not been monitored yet. In our research project, the contribution of both natural and anthropogenic emission to atmospheric methane is estimated in Western Siberia. With geographical information technology combined with land unit classification using satellite images and ground measurements, area fluxes of methane are evaluated. Hyper-spectral remote sensing data is used to quantify the methane concentration in the atmosphere over the large area.

Key words: Methane, hyper-spectral remote sensing, West Siberian peat land and permafrost ecosystems.

Поступила в редакцию: 11.11.2010
Переработанный вариант: 08.04.2011