

ИССЛЕДОВАНИЕ ПРОЦЕССОВ ФОРМИРОВАНИЯ ПОЛЯ МЕТАНА В АТМОСФЕРЕ СЕВЕРО-ЗАПАДНОГО РЕГИОНА РОССИЙСКОЙ ФЕДЕРАЦИИ

© 2006 г. М. В. Макарова¹, А. В. Поберовский¹, С. В. Яговкина², И. Л. Кароль²,
В. Е. Лагун³, Н. Н. Парамонова⁴, А. И. Решетников⁴, В. И. Привалов⁴

¹Санкт-Петербургский государственный университет
198504 Санкт-Петербург, Петродворец, ул. Ульяновская, 1
E-mail: pober@troll.phys.spbu.ru

²Главная геофизическая обсерватория им. А.И. Воейкова
194021 Санкт-Петербург, ул. Карбышева, 7
E-mail: Karol@main.mgo.rssi.ru

³Арктический и Антарктический научно-исследовательский институт
199397 Санкт-Петербург, ул. Беринга, д. 38
E-mail: lagun@aari.nw.ru

⁴Научно-исследовательский центр дистанционного зондирования атмосферы (НИЦДЗА, филиал ГГО)
Поступила в редакцию 30.12.2004 г., после доработки 06.04.2005 г.

На основе анализа результатов измерений приземной концентрации и общего содержания метана в окрестностях Санкт-Петербурга, траекторий движения воздушных масс и разработанной трехмерной региональной модели переноса примеси исследованы основные процессы, формирующие поле метана в атмосфере Северо-Западного региона России. Показано, что вклад эмиссии метана от индустриального центра в общее содержание метана в столбе атмосферы составляет не более 2% от среднего значения. В тоже время эта эмиссия приводит к вариациям приземного метана в окрестностях Санкт-Петербурга, составляющим до 50%. Происхождение воздушных масс, поступающих в район измерений, оказывает влияние как на общее содержание, так и на приземную концентрацию метана. Воздушные массы, прошедшие над континентальной частью Западной и Восточной Европы, характеризуются повышенными примерно на 4% значениями общего содержания и приземной концентрации метана, по сравнению с воздушными массами, сформированными над океаном, которые поступают в район исследований с северо-запада. Региональная модель переноса парниковых газов удовлетворительно описывает результаты приземных измерений и воспроизводит наблюдаемые тенденции изменения общего содержания метана. Оценка интегральной эмиссии метана в атмосферу с территории Санкт-Петербурга его промышленных пригородов, выполненная с использованием разработанной модели, составила около 100 к илотонн/год.

ВВЕДЕНИЕ

Одной из основных проблем прогнозирования возможных изменений климата является корректный учет пространственно-временной изменчивости содержания парниковых и химически активных газов в численных моделях атмосферы. Это невозможно сделать без надежных данных об интенсивности региональных источников, о концентрациях таких газов, и о сезонных и долгопериодных вариациях этих параметров. Измерения содержания атмосферных газов, используемые совместно с трехмерными региональными моделями переноса примеси, позволяют оценивать эмиссию парниковых газов от антропогенных и естественных источников, определять влияние регионального и трансграничного переноса воздушных масс, выявлять годовой ход эмиссии и оценивать влияние источников на формирование

полей концентрации газа. Такой подход эффективно используется для изучения малых газовых составляющих, имеющих большое время жизни, в частности, для метана [1].

Целью настоящей работы являлось изучение основных факторов, ответственных за формирование поля метана в атмосфере Северо-Западного региона РФ. Исследование проводилось на основе анализа результатов измерений [2, 3, 4], траекторий движения воздушных масс [5] и численного моделирования полей концентрации метана [1].

Использованы результаты газохроматографических измерений приземных концентраций метана и спектроскопических измерений общего содержания метана (далее – ОСМ) во всей толще атмосферы. Эти измерения дают разные характеристики содержания газа в атмосфере. Привлечение модельных расчетов к анализу результатов

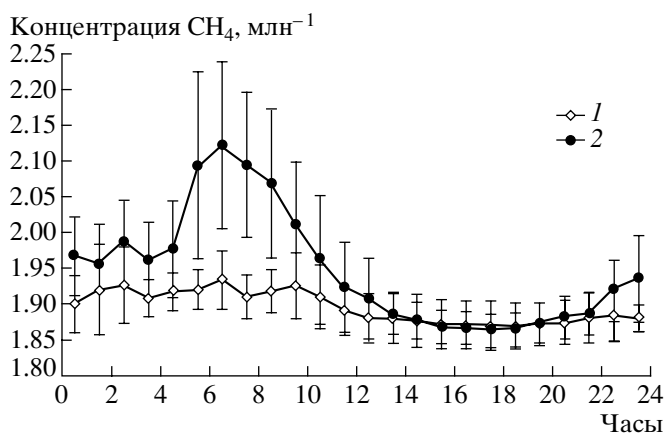


Рис. 1. Средний суточный ход концентрации метана для летних условий (выборка результатов измерений, выполненных при температуре воздуха выше 10°C). 1, 2 – направление ветра из “чистого” (0–175°) и из городского (200–300°) сектора.

измерений позволяет на качественно новом уровне исследовать изменения ОСМ и концентраций метана в атмосфере [16]. Для воспроизведения поля содержания метана используется трехмерная региональная модель переноса примеси в тропосфере, имеющая высокое пространственное разрешение [1]. Для расчета обратных траекторий движения воздушных масс используется модель NOAA ARL HYSPLIT [5].

Разработка и апробация новейших систем спутниковых измерений малых газовых составляющих [7] определяет актуальность подхода, предложенного в настоящей статье, поскольку организация подспутниковых спектроскопических и приземных наблюдений с усвоением их результатов в численной модели позволяет качественно улучшить процесс валидации данных дистанционного зондирования газового состава атмосферы.

1. ЭКСПЕРИМЕНТАЛЬНЫЕ ДАННЫЕ

1.1 Измерения приземных концентраций метана

Измерения приземной концентрации метана в пос. Воейково (59°57'N, 30°42'E), расположенном в 12 км восточнее административной границы Санкт-Петербурга проводились с 1995 г. [3, 4]. От пос. Воейково в северо-западном и юго-западном направлениях (200°–300°) находятся территории Санкт-Петербурга и его промышленных пригородов, а в северо-восточном и юго-восточном направлениях (0°–175°) вплоть до Ладожского озера находятся малонаселенные заболоченные низменности. Измерения выполнялись круглосуточно недельными сериями примерно раз в месяц. Концентрация метана регистрировалась каждые 10 минут с погрешностью 0.2% [3, 4]. Подробное описание установки приведено в работе

[4]. Шкала измерений привязана к эталону ВМО калибровкой аппаратуры относительно стандартной газовой смеси. Выполненные международные сравнения показали хорошее согласие результатов измерений НИЦДЗА в Воейково с результатами ведущих лабораторий Европы [8].

Как показали первые результаты измерений, представленные в [3], эмиссия метана в окрестностях Воейково пространственно неоднородна. Высокие значения концентрации (до 2.8 мЛн⁻¹) наблюдаются при направлениях ветра из сектора 200–320 градусов, который близок к сектору угловых границ Санкт-Петербурга [3]. При поступлении воздушных масс из “чистого” сектора (0–180° и 330–360°) значения концентраций не превышают 2.2 мЛн⁻¹.

В данной работе закономерности изменения приземной концентрации метана рассмотрены на основе осредненных зависимостей, полученных для выборок из массива данных (1995–2000 гг.), включающего более 5000 с реднечасовых значений концентрации метана с текущей метеорологической информацией. Влияние источников, расположенных в радиусе 40–50 км от точки измерений (местные источники), наиболее ярко проявляется в суточном ходе концентрации метана при условии существенного изменения интенсивности процессов перемешивания в атмосфере в течение суток. Такие ситуации реализуются летом в антициклональных условиях. Возникающая при этом приземная температурная инверсия создает устойчивую стратификацию в приземном слое атмосферы, затрудняя вертикальный воздухообмен и уменьшая в несколько раз высоту слоя перемешивания [9]. Это приводит к ночному накоплению метана вблизи подстилающей поверхности. Прогрев подстилающей поверхности в дневное время приводит к формированию развитой турбулентности. По мере прогрева у земли формируется хорошо перемешанный слой, толщина которого возрастает. После полудня высота слоя перемешивания может превышать 1000 м [9]. Сильное вертикальное перемешивание (неустойчивая стратификация) приводит к эффективному снижению количества метана, накапливающегося в ночное время вблизи поверхности, и существенно ослабляет влияние местных источников на формирование приземной концентрации.

Различие в суточном ходе метана в летних условиях при направлениях ветра из “чистого” (0–175°) и городского (200–300°) секторов видно на рис. 1. Превышение концентрации в утренние часы, по сравнению с периодом интенсивного дневного перемешивания (17–19 часов местного времени) составляет 0.05–0.06 мЛн⁻¹ в условиях поступления воздушных масс из “чистого” сектора и 0.24–0.25 мЛн⁻¹ в условиях, когда ветер направлен от Санкт-Петербурга. В “чистом” секторе источ-

ником метана является только эмиссия от болотных комплексов в летний сезон. Соотношение амплитуд суточного хода для выборок, представленных на рис. 1, свидетельствует о том, что удельная эмиссия городского происхождения превышает интенсивность естественной эмиссии в несколько раз. Особенности суточного хода не только позволяют судить о наличии источников эмиссии, но и дают информацию об их интенсивности. Подход к оценке эмиссии метана с территории Санкт-Петербурга, основанный на измерениях, выполненных в пос. Воейково, и на модельных расчетах скорости накопления метана в инверсионных условиях, описан в работах [10, 11].

В условиях интенсивного дневного перемешивания вклад местных источников в формирование приземной концентрации метана очень мал. Это следует из совпадения значений концентрации в дневные часы (как правило, от 15 до 20 ч асов местного времени) в выборках, представленных на рис. 1 (направление ветра из “чистого” и городского секторов).

Еще одним фактором, приводящим к снижению вклада близко расположенных источников в формирование приземной концентрации, является увеличение скорости ветра, поскольку накопление примеси пропорционально продолжительности периода прохождения воздушной массы над областью действия источников. Кроме того, возрастание скорости ветра сопровождается интенсификацией процессов перемешивания и соответственно увеличением высоты слоя перемешивания [9]. Результаты измерений в пос. Воейково показывают, что если ветер дует от Санкт-Петербурга и его скорость превышает 3 м/с, то не наблюдается высоких (выше 2.2 млн^{-1}) значений приземной концентрации метана.

Выборка данных, для которых вклад местных источников в формирование приземной концентрации метана мал, сделана из общего массива по двум параметрам: скорость ветра должна превышать 3 м/с и время суток должно соответствовать периоду интенсивного дневного перемешивания (с 15 до 20 часов местного времени). Уровень концентрации для выборки данных, сформированной по указанным критериям, в среднем на 0.04 млн^{-1} выше фонового уровня. Величина превышения над фоном зависит от направления переноса воздушных масс (см. рис. 2). При направлениях ветра из сектора $270^\circ\text{--}360^\circ\text{--}70^\circ$ значения концентрации в среднем примерно на 0.02 млн^{-1} превышают фоновые значения. Среднефоновые значения, полученные на ближайшей фоновой станции Териберка ($69^\circ 12' \text{N}$, $35^\circ 06' \text{E}$) в течение рассматриваемого периода (1996–2000 гг.), составляют $1.840 \pm \pm 0.005 \text{ млн}^{-1}$ [12, 13]. При южных направлениях ветра ($90^\circ\text{--}240^\circ$), указанное превышение составляет 0.06 млн^{-1} . Привлечение к анализу не только

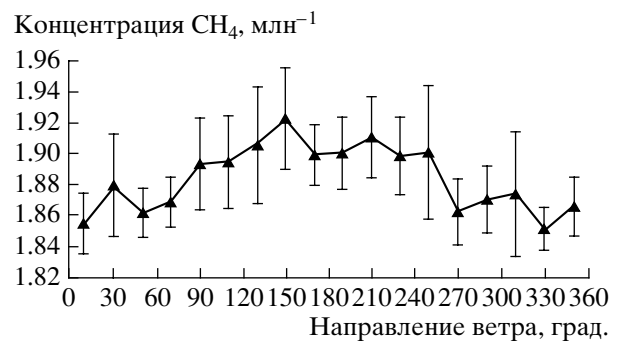


Рис. 2. Зависимость концентрации метана от направления ветра для условий интенсивного перемешивания.

данных о направлении ветра, но и о траектории движения воздушных масс к месту наблюдений [14], показало, что прохождение воздушных масс над южными секторами (Западная и Восточная Европа) приводит к возрастанию концентрации в пос. Воейково примерно на 4% по сравнению с условиями, когда воздушные массы поступают из чистых океанических районов. Это согласуется с данными рис. 2. Анализ влияния траекторий движения воздушных масс на приземную концентрацию метана в пос. Воейково [14] в условиях слабого влияния местных источников был выполнен для 1996–1998 гг. аналогично анализу, описанному в разделе 2.3 для общего содержания метана.

Данные, полученные в условиях интенсивного перемешивания в пограничном слое атмосферы, обработаны статистически на основе программы CCGvu [15] и позволяют выделить сезонный ход концентрации метана, который представлен на рис. 3 и рассмотрен совместно с годовым ходом ОСМ.

1.2. Спектроскопические измерения общего содержания метана

Измерения ОСМ проводятся с 1991 г. в Старом Петергофе примерно в 35 километрах к юго-западу от центра Санкт-Петербурга ($59^\circ 88' \text{N}$, $29^\circ 83' \text{E}$) [2]. Угловые размеры границ города относительно точки наблюдений находятся в пределах $40^\circ\text{--}130^\circ$. Используемый метод определения общего содержания атмосферных газов основан на интерпретации ИК-спектров прямого солнечного излучения и обеспечивает получение среднесуточных измерений ОСМ с погрешностью в пределах 1–3%. Сравнения методик наземных спектроскопических измерений ОСМ (НИИФ СПбГУ, ИФА РАН и НПО “Тайфун”) показали, что результаты единичных измерений согласуются в пределах погрешностей этих измерений, составляющих $\sim 3\text{--}4\%$ [16].

В течение 1998–2000 гг. для временного интервала с декабря по май в Старом Петергофе одновременно проводились измерения ОСМ и приземной концентрации метана в условиях интенсивно-

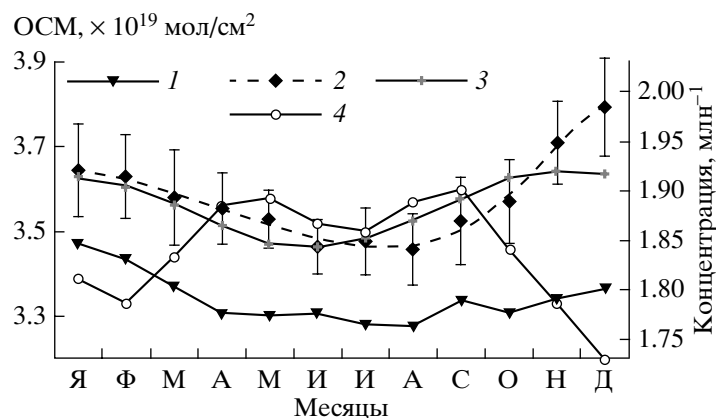


Рис. 3. Годовой ход общего содержания и приземной концентрации метана, где 1 – годовой ход ОСМ для 1999 г., 2 – средний годовой ход ОСМ за период 1991–2003 гг., 3 – средний годовой ход приземной концентрации CH_4 в пос. Воейково (1995–2000 гг.), 4 – средний годовой ход ОСМ на станции Ни-Алезунд (1992–1995 гг.) [17].

го перемешивания в период между 15 и 17 часами [2]. Была выполнена двадцать одна пара измерений. Расчет коэффициента корреляции r между результатами одновременных измерений приземных концентраций и ОСМ выявил положительную корреляцию. Значения коэффициента корреляции и его среднеквадратического отклонения составили $r = 0.75$ и $\sigma_r = 0.095$ ($3\sigma_r = 0.29$) соответственно. Значимая корреляция свидетельствует о наличии общих факторов, вызывающих вариации ОСМ и приземной концентрации в условиях интенсивного перемешивания. Одним из таких факторов является дальний перенос примеси, о чем свидетельствуют в основном согласующиеся результаты анализа траекторий движения воздушных масс, выполненного как для приземной концентрации, так и для ОСМ. В 25% случаев наблюдающиеся изменения общего содержания и приземной концентрации метана не согласуются между собой. Это обусловлено тем, что приземная концентрация характеризует содержание метана в слое перемешивания, а вариации ОСМ связаны в основном с изменением концентрации выше планетарного пограничного слоя. Различие траекторий движения воздушных масс на разных высотах тоже может приводить к наблюдаемой несогласованности.

Изменчивость среднесуточных значений ОСМ в среднем составляет ~3–5% и возрастает в холодный период года. Однако иногда в течение 2–3 дней наблюдались изменения ОСМ порядка 10–12%. Эти наблюдения требуют дополнительного объяснения. Такие изменения отмечены в апреле 1999 г., т.е. в течение периода, используемого в дальнейшем для совместного анализа экспериментальных данных, результатов численного моделирования полей концентрации метана и обратных траекторий движения воздушных масс.

В течение всего 1999 г. (в частности, в апреле) наблюдались пониженные значения ОСМ (рис. 3). Характер годовых изменений в отдельные годы может существенным образом отличаться от среднего сезонного хода. Средний сезонный ход ОСМ для района Санкт-Петербурга имеет максимум в ноябре–декабре и минимум в июне–августе (см. рис. 3). Амплитуда его составляет ~4.5% или 0.17×10^{19} мол/с м². Пример более сложного годового хода (с амплитудой около 6%), полученного по результатам измерений ОСМ в 1992–1995 гг. на станции Ни-Алезунд (Шпицберген, 78.9°N, 11.9°E), приведен на рис. 3 [17]. Средний годовой ход общего содержания метана для Санкт-Петербурга и Ни-Алезунда различен. На станции Ни-Алезунд, помимо глубокого зимнего минимума, наблюдается уменьшение ОСМ в июне–июле, которое, вероятно, обусловлено летним возрастанием концентрации радикала гидроксила в атмосфере. Авторы работы [17] связывают наблюдаемый сезонный ход ОСМ с особенностями атмосферной циркуляции в Северной полярной области.

На том же рисунке приведен средний сезонный ход приземной концентрации CH_4 по данным измерений в пос. Воейково. Амплитуда сезонных вариаций приземного метана в районе Санкт-Петербурга, составляющая 2% (или 0.04 млн⁻¹), примерно в 2 раза больше, чем в фоновых условиях [13]. Увеличение амплитуды сезонных вариаций обусловлено в значительной степени сезонным изменением высоты слоя перемешивания и характерно для районов, где существуют источники метана. Для ОСМ характерна большая амплитуда сезонных изменений. Она может быть связана с сезонными изменениями концентрации метана в атмосфере выше пограничного слоя. Летний минимум приземной концентрации метана в пос. Воейково наблюдается в мае, а не в июле, как следует из измерений островных станций того же ши-

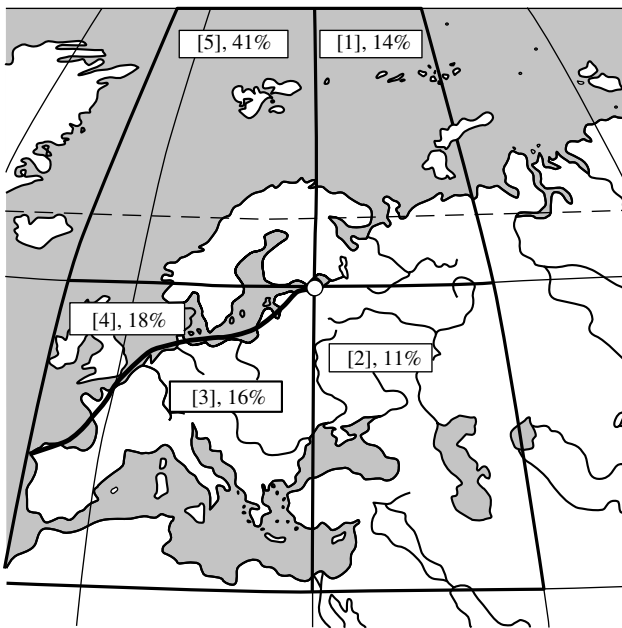


Рис. 4. Разделение сопредельных территорий на пять основных секторов (указаны процентные доли воздушных масс, пришедших из каждого сектора в течение 180 дней измерений).

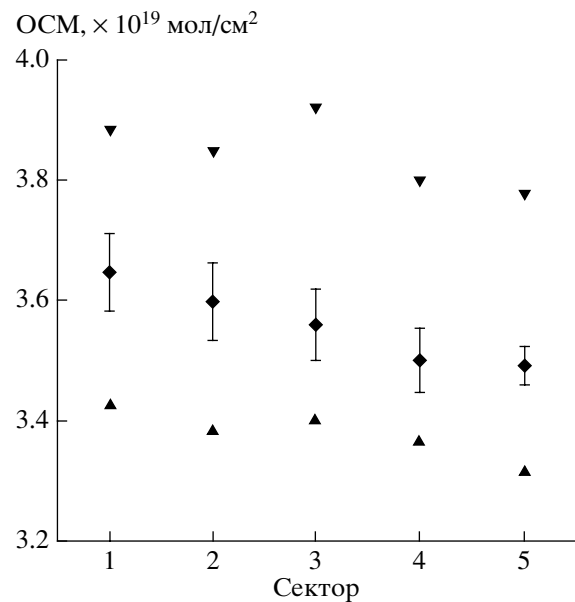


Рис. 5. Распределение средних, минимальных и максимальных значений ОСМ по секторам (построено по всему массиву измерений, выполненных в период 1998–1999 гг.).

ротного пояса [13] и из среднего годового хода ОСМ. Причиной наблюдаемого смещения может быть влияние эмиссии метана из естественных источников, которая максимальна во второй половине лета [18–20].

1.3. Влияние траекторий движения воздушных масс на ОСМ

Совместный анализ ОСМ и траекторий движения воздушных масс мы провели для периода с января 1998 по декабрь 1999 г. (всего 180 дней измерений). Для этого периода были характерны сильные нерегулярные изменения ОСМ. Для каждого из дней измерений ОСМ были построены 120 часовые траектории движения воздушных масс [5] за на высотах 50, 1500 и 3000 м. Траектории движения воздушных масс были рассчитаны именно для этих высот, так как 50 м – это высота пункта измерений, 1500 м – верхняя граница пограничного слоя атмосферы и 3000 м – высота, характеризующая динамику воздушных масс в нижней тропосфере.

Территория, прилегающая к району исследований, была условно разделена на пять секторов (см. рис. 4): 1) Баренцево море и север Европейской части РФ; 2) континентальная часть РФ (юго-восточнее Санкт-Петербурга); 3) Европа; 4) Балтийское море; 5) Северо-Европейский бассейн и Скандинавия. Анализ обратных траекторий показал, что в течение суток до прихода в Санкт-Петербург траектории движения воздуш-

ных масс на указанных трех высотах в 90% случаев проходили в одних и тех же секторах. Мы отнесли воздушную массу к некоторому конкретному сектору в том случае, если она находилась в этом секторе в течение двух суток перед приходом в район Санкт-Петербурга. Воздушные массы, имевшие сложные траектории движения и неспособные каким-либо одним сектором, исключались из анализа. На рис. 4 в процентах указана частота прихода воздушных масс в Санкт-Петербург из каждого сектора. Видно, что преобладающим является северо-западный перенос (сектор 5).

Общее количество дней измерений было недостаточно для анализа влияния переноса воздушных масс в каждый из сезонов. На рис. 5 приведены распределения средних, минимальных и максимальных значений ОСМ по секторам, показанным на рис. 4. Минимальное ОСМ (которое чаще всего наблюдается летом) можно рассматривать как минимальное фоновое значение для выделенного сектора в 1998–1999 гг. На величину максимальных значений, наблюдающихся обычно в осенне-зимний период, могут оказывать влияние антропогенные источники, расположенные вдоль траектории движения воздушной массы. Воздушные массы с высоким содержанием метана характерны для континентальной части РФ (секторы 1 и 2). Воздушные массы с относительно низким содержанием метана приходят из секторов 4 и 5, а воздушные массы со средними значениями ОСМ – из Европы (сектор 3). Относительные различия средних

значений ОСМ, вычисленных для секторов 4, 5 и 1, 2 могут составлять ~4–5%, то есть сравнимы с амплитудой годового хода ОСМ для Санкт-Петербурга.

Совместный анализ приземных и спектроскопических измерений показывает, что влияние рассмотренных механизмов на формирование полей приземной концентрации и общего содержания метана принципиально различно. Наиболее значительные вариации приземной концентрации метана обусловлены местными источниками, расположенными в радиусе 50–60 км. Максимальная изменчивость ОСМ связана с изменением концентрации метана в верхней тропосфере. Вместе с тем в условиях интенсивного дневного перемешивания, когда влияние локальных местных источников на приземные значения концентрации менее заметно, могут проявляться общие факторы, формирующие оба поля. Одним из таких общих факторов является дальний перенос примеси. Об этом свидетельствует значимая корреляция приземной концентрации и ОСМ, полученная по результатам измерений в Петергофе. В пользу этого вывода также свидетельствуют согласующиеся результаты анализа обратных траекторий как для приземной концентрации, так и для общего содержания метана в столбе атмосферы.

2. МОДЕЛЬНЫЕ ОЦЕНКИ

2.1. Региональное моделирование полей содержания метана

Для воспроизведения поля концентрации метана над северо-западной частью Европейской территории РФ (55° – 65° N \times 20° – 40° E) мы используем трехмерную региональную модель переноса примеси в тропосфере с усвоением данных прямых измерений приземной концентрации и общего содержания метана в атмосферном столбе, полученных на станциях Воейково и Петергоф соответственно. Модель обеспечивает высокое пространственное разрешение (шаги 0.5° по широте и 0.25° по долготе) и включает блок переноса примеси и блок детального описания вертикальной структуры планетарного пограничного слоя [1]. Модель позволяет учесть распределение источников метана в промышленном регионе и достаточно точно сопоставить между собой измеренные и рассчитанные значения его концентраций. В качестве исходной метеорологической информации для исследуемого периода мы используем архив реанализа Европейского центра среднесрочных прогнозов погоды ERA-40 [21] с шагом по времени 6 часов и с шагом по пространству 2.5 градуса. Расчеты выполнены с использованием сплайновой интерполяции данных реанализа по времени и пространству в узлы модельной сетки.

2.2. Эмиссия метана от подстилающей поверхности и граничные условия

Для проведения расчетов было введено в модель и протестировано несколько вариантов распределения местных естественных и антропогенных источников метана. Первоначальный вариант географического распределения потоков метана от подстилающей поверхности подготовлен на основе карт природных комплексов и почвенного покрова Ленинградской области (естественные источники метана); кроме этого в качестве первого приближения были использованы оценки антропогенной эмиссии метана с территории Санкт-Петербурга его окрестностей, представленные в [10, 11]. Для характерных значений потоков метана от природных комплексов использованы результаты многолетних прямых измерений концентраций и потоков метана в районах болотных систем Швеции и Финляндии [18–20], сходных с Ленинградской областью по условиям формирования экосистем на переувлажненных территориях.

Фоновое содержание метана у поверхности (1.86 млн $^{-1}$ по объему для южной и восточной границ, 1.83 млн $^{-1}$ для западной границы и 1.84 млн $^{-1}$ для северной границы области до высоты 11 км) задано на основе результатов измерений метана в Финляндии [19], на фоновой станции Териберка [12, 13], и с учетом минимальных значений концентрации метана, измеренных в пос. Воейково при соответствующих направлениях ветра. Содержание метана на верхней границе модельной области задавалось как 1.81 млн $^{-1}$ по объему (вариант 1) или 1.72 млн $^{-1}$ по объему (вариант 2) (см., например, [22]). При расчете по второму варианту отношение смеси метана на западной границе области в слое выше 2 км было принято равным 1.66 млн $^{-1}$, так как предварительные результаты п. 1.3 показали, что из этого сектора поступают обедненные метаном воздушные массы.

Модельный анализ проведен для зимне-весеннего периода, когда городская эмиссия метана наиболее заметно влияет на его содержание в атмосфере. В этот период основным источником метана в регионе является эмиссия с территории Санкт-Петербурга и в незначительной степени эмиссия с территории болотных комплексов его окрестностей. Расчеты были выполнены для апреля 1999 г., когда одновременно проводились измерения приземной концентрации и ОСМ и когда происходила смена воздушных масс. Для анализа формирования поля метана и для выявления наиболее адекватного распределения и интенсивности региональных источников метана, оказывающих влияние на его концентрацию на станции в пос. Воейково, был разработан и протестирован ряд вариантов задания нижнего граничного условия модели.

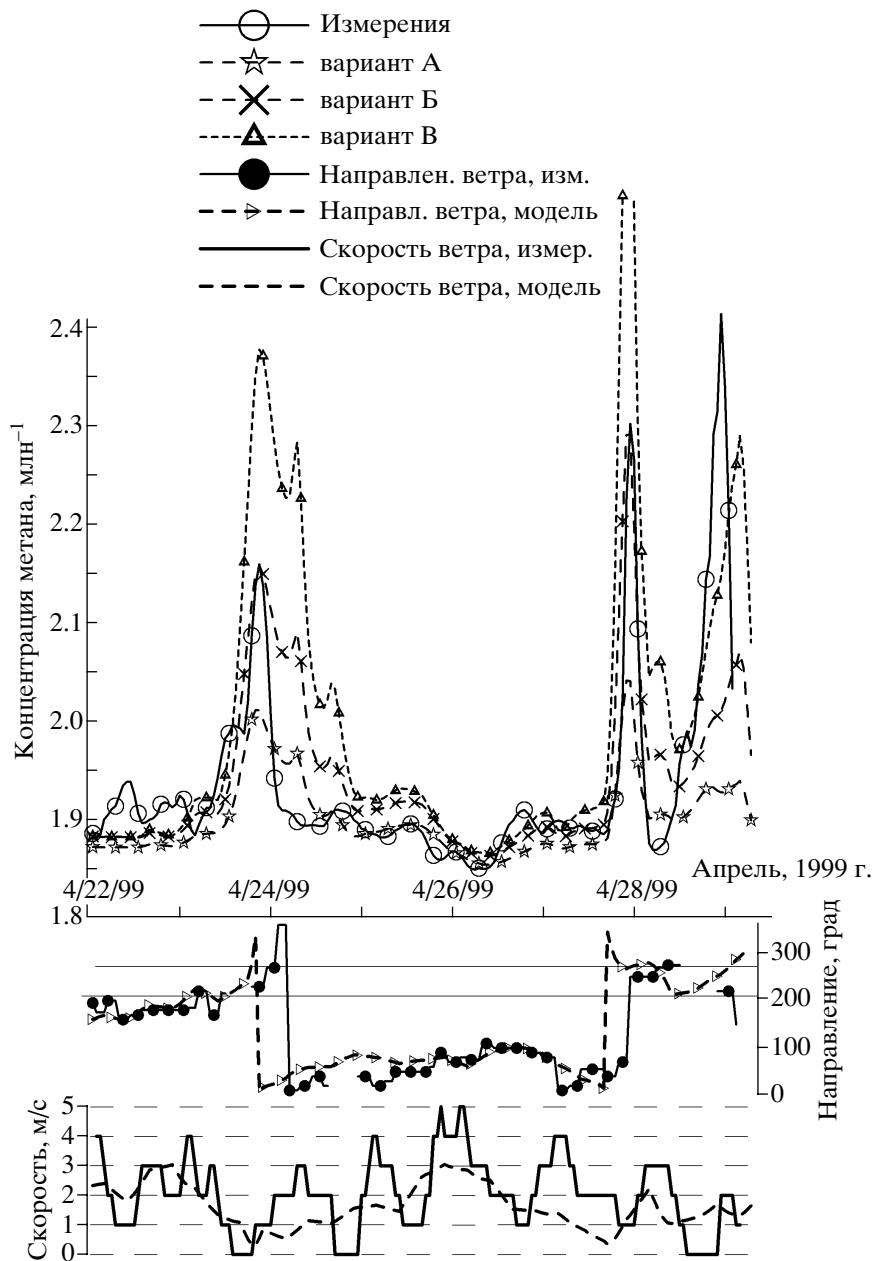


Рис. 6. Сопоставление результатов приземных измерений с результатами моделирования концентрации метана, направления и модуля скорости приземного ветра (апрель 1999 г., пос. Воейково).

2.3. Моделирование приземных концентраций метана

Рисунок 6 позволяет сравнить измеренные и вычисленные значения концентрации метана в районе станции Воейково для периода синхронных наблюдений. Данные измерений представлены со скользящим осреднением по времени с шагом 2 часа. Различие между используемыми в модели и измеренными скоростями приземного ветра по модулю и по направлению, как правило, не превосходит погрешность измерений. На осно-

ве предварительных оценок [10, 11] был определен и протестирован ряд вариантов задания эмиссии метана с территории Санкт-Петербурга. Результаты моделирования приведены для трех следующих вариантов значений интенсивности эмиссии: А – $130 \text{ м г (м}^2 \text{ сут)}^{-1}$; Б – $300 \text{ м г (м}^2 \text{ сут)}^{-1}$; В – $600 \text{ м г (м}^2 \text{ сут)}^{-1}$. Как следует из рис. 6, для варианта Б модель удовлетворительно описывает изменения приземной концентрации метана, связанные с влиянием городских источников. Расчеты показали (рис. 8б), что эмиссия с территории Санкт-Петербурга влияет на приземные концент-

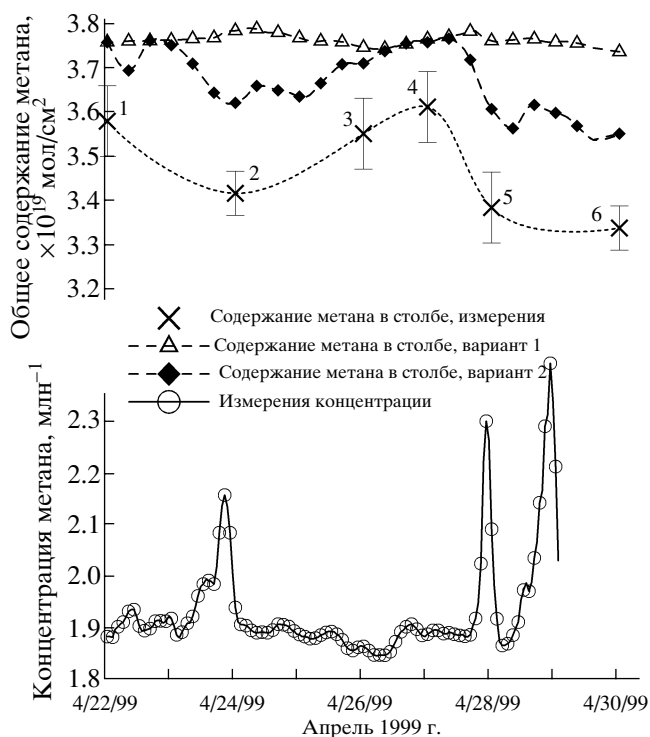


Рис. 7. Измеренные и вычисленные значения содержания метана в столбе атмосферы для двух вариантов задания верхнего граничного условия (верхняя часть рисунка) и измеренные значения приземной концентрации метана (нижняя часть рисунка), апрель 1999 г.

рации метана на расстоянии 150–200 км от города. Интегральная эмиссия с территории Санкт-Петербурга, соответствующая варианту Б, составляет ~84 кт/год (1 кт = 10^6 кг), а с учетом южных промышленных пригородов – около 100 кт/год. Оценки интегральной эмиссии метана с территории Санкт-Петербурга, полученные в данной работе, примерно в 1.5 раза выше оценок, полученных на основе модельного описания летнего накопления метана в условиях приземной инверсии температуры. Одной из возможных причин расхождений могут быть сезонные изменения эмиссии, так как оценки в данной работе выполнены для апреля, когда отопительный сезон еще не закончен, а оценки в [10, 11] выполнены для летнего сезона. Измерения содержания изотопов метана в воздухе, отобранном в пос. Воейково, показали, что на территории Санкт-Петербурга утечки из газораспределительной системы являются одним из основных источников эмиссии [13]. Согласование оценок, выполненных разными методами, является задачей другой работы; такое согласование должно быть проведено на базе одного и того же экспериментального материала и одной и той же метеорологической информации, и должно рассматривать эмиссию с одной и той же площади.

Некоторые расхождения модельных и измеренных значений концентраций могут быть обусловлены интерполяцией метеорологических полей с сетки $2.5^\circ \times 2.5^\circ$ в сетку $0.5^\circ \times 0.25^\circ$, что неизбежно дает поля, более сглаженные по пространству по сравнению с реальными полями. Появление дополнительных “ложных” максимумов модельной концентрации можно объяснить занижением модельной скорости ветра, приводящим к возникновению инверсионной ситуации, которая в действительности не наблюдалась. Возможно, требуется детализация распределения источников, для чего необходимо повышение пространственного разрешения модели, и, следовательно, больший объем вычислений. В дальнейшем это требование может быть выполнено. Вместе с тем уточнение модельного описания не является принципиальным для решения задачи совместной интерпретации локальных и спектроскопических измерений содержания метана.

2.4. Результаты моделирования и анализ общего содержания метана

Для понимания процессов, формирующих содержание метана во всей толще атмосферы, выполнена оценка вклада различных слоев атмосферы в вариации общего содержания метана, а также оценено влияние изменений атмосферного давления на результаты измерений (см. таблицу). Верхняя граница используемой трехмерной региональной модели переноса находится на уровне 11 км (около 200 гПа). Поэтому для сопоставления модельных расчетов с измерениями общего содержания метана необходимо оценить вклад слоев, расположенных выше 200 гПа. Для таких оценок, выполненных для Северо-Западного региона РФ, использованы следующие данные: 1) результаты расчетов трехмерного распределения метана по глобальной фотохимической модели МЕЗОН [23], описывающей вертикальное строение атмосферы от 1000 до 1 гПа и учитывающей годовой ход содержания радикала гидроксила, и 2) результаты спутниковых (HALOE) измерений содержания метана в стратосфере. В [23] диапазон сезонных изменений вклада надтропосферных слоев составил от 7.1×10^{18} мол см^{-2} (февраль, март) до 7.8×10^{18} мол см^{-2} (октябрь–декабрь), т.е. не более 2% от содержания CH_4 в атмосферном столбе. Расчеты, проведенные по данным [24] (спутниковый эксперимент HALOE), показали, что изменения содержания CH_4 в стратосфере могут приводить к изменениям ОСМ на 2%. Изменение высоты тропопаузы тоже может влиять на наблюдаемые вариации ОСМ. Это связано с особенностями вертикального распределения концентрации метана в атмосфере: если в тропосфере концентрация метана практически постоянна, то выше тропопаузы она начинает до-

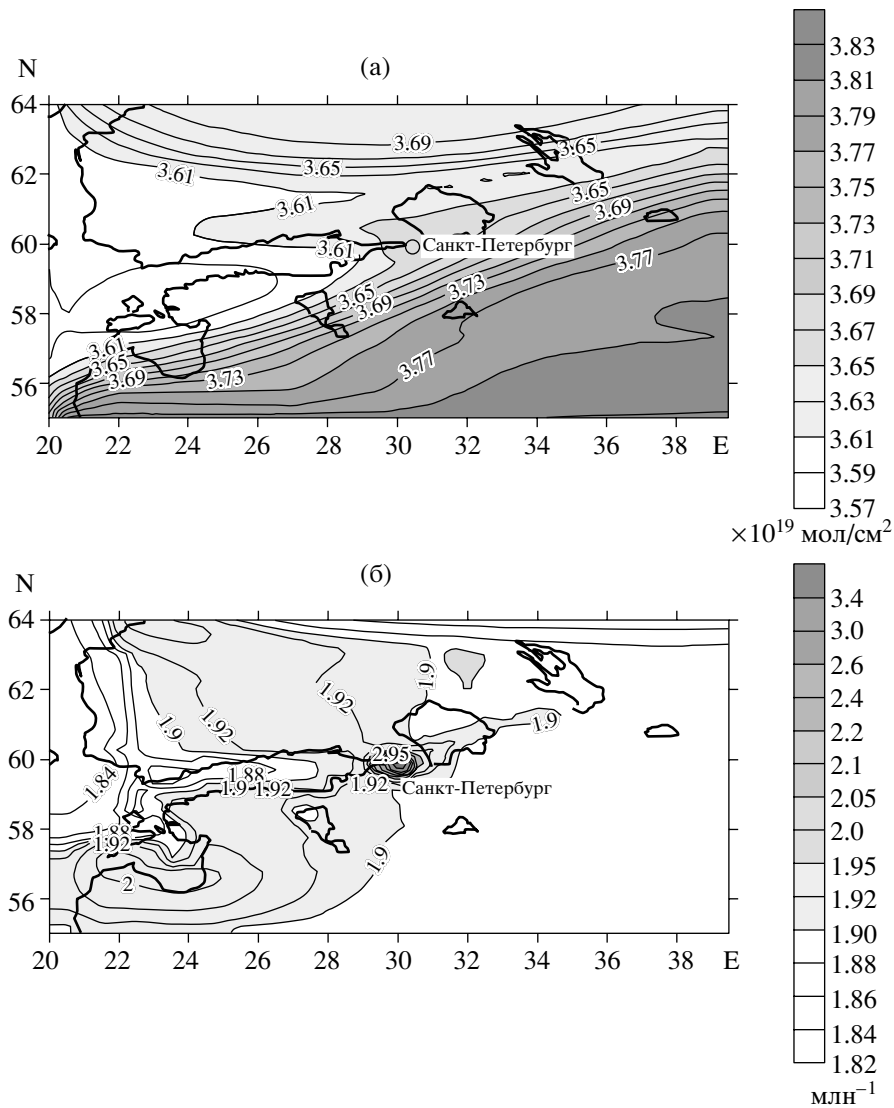


Рис. 8. Модельные распределения общего содержания метана ($\text{мол см}^{-2} 10^{19}$) до высоты 11 км (а) и приземной концентрации (млн^{-1}) для уровня ~10–15 м (б) над Северо-Западом Российской Федерации (24 апреля 1999 г.).

статочно быстро уменьшаться. Расчеты показали, что варьирование высоты тропопаузы (от 8 до 12 км) может изменить ОСМ на ~1.5%. Эти оценки, а также вклады приземных атмосферных сло-

ев 0–1, 0–2, 1–11 и 2–11 км в изменчивость общего содержания метана в столбе атмосферы при различных профилях концентрации метана и различных приземных давлениях, приведены в таб-

Модельные оценки вклада различных факторов в формирование общего содержания метана в столбе атмосферы

Параметр	Слой атмосферы	Диапазон изменения	Изменение ОСМ относительно среднего значения параметра, %
Вертикальный профиль концентрации метана (для приземного давления 1000 г Па)	0–1 км	2.8–1.8 млн ⁻¹	~1.8
	0–2 км	2.8–1.8 млн ⁻¹	~3
	1–11 км	1.6 млн ⁻¹ –1.8 млн ⁻¹	~7
Содержание метана	>11 км	$7.1\text{--}7.8 \times 10^{18}$ мол см ⁻²	<2
Высота тропопаузы	–	8–12 км	~1.5
Приземное давление	–	1000 г Па–1030 г Па	2.5

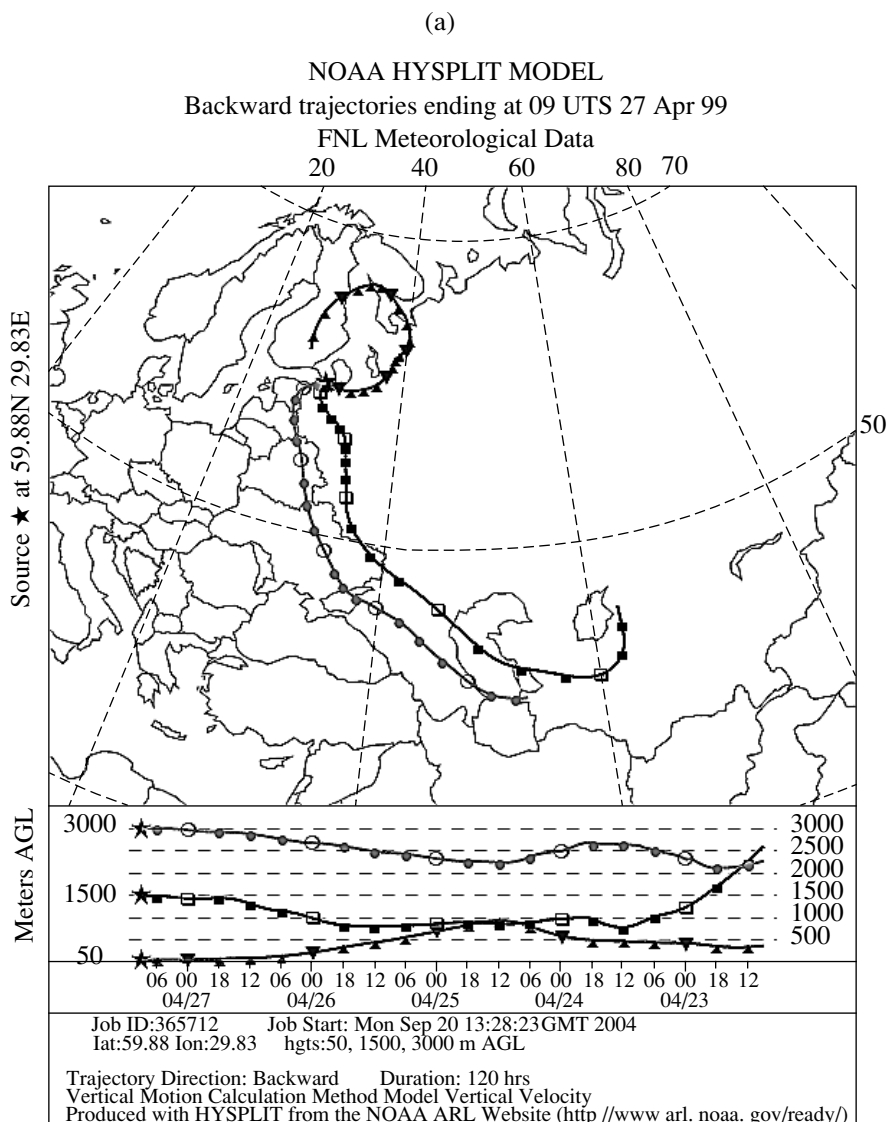


Рис. 9. Обратные траектории движения воздушных масс, 27 (а) и 30 (б) апреля 1999 г.

лице. Вычисления выполнены на основе одномерной модели для столба атмосферы. Оценка вкладов слоев 0–1 км и 0–2 км проведена для профиля концентраций метана, убывающих линейно с высотой от отношения смеси 2.8 млн^{-1} у поверхности до 1.8 млн^{-1} на высоте 1 км (2 км) и остающихся постоянными до верхней границы модельной области (11 км).

Таким образом, наибольший вклад в изменения ОСМ в атмосферном столбе вносят изменения содержания метана в верхних слоях тропосферы и изменения в распределении поля приземного давления. В верхней части рис. 7 приведены измеренные и модельные (рассчитанные для эмиссии метана по варианту Б) апрельские (1999 г.) значения содержания метана в столбе атмосферы. Модельные значения получены для двух способов за-

дания верхнего граничного условия (варианты 1 и 2, см. п. 2.2). На нижней части рис. 7 приведены концентрации метана, измеренные в тот же период в приземном слое атмосферы. Рисунок 7 показывает, что зафиксированное на станции Воейково 24 и 28 апреля 1999 г. значительное увеличение отношения смеси метана вблизи земной поверхности никак не проявилось ни в измерениях общего содержания метана, выполненных в Петергофе (рис. 7), ни в значениях этого параметра, рассчитанных по модели (различия общего содержания метана для двух станций, согласно модельным оценкам, не превышают 1.1–5%). Однако трансформация воздушных масс 24 апреля и 27–28 апреля 1999 г., вызванная изменением направления воздушного переноса в тропосфере, привела к значительному изменению общего содержания метана.

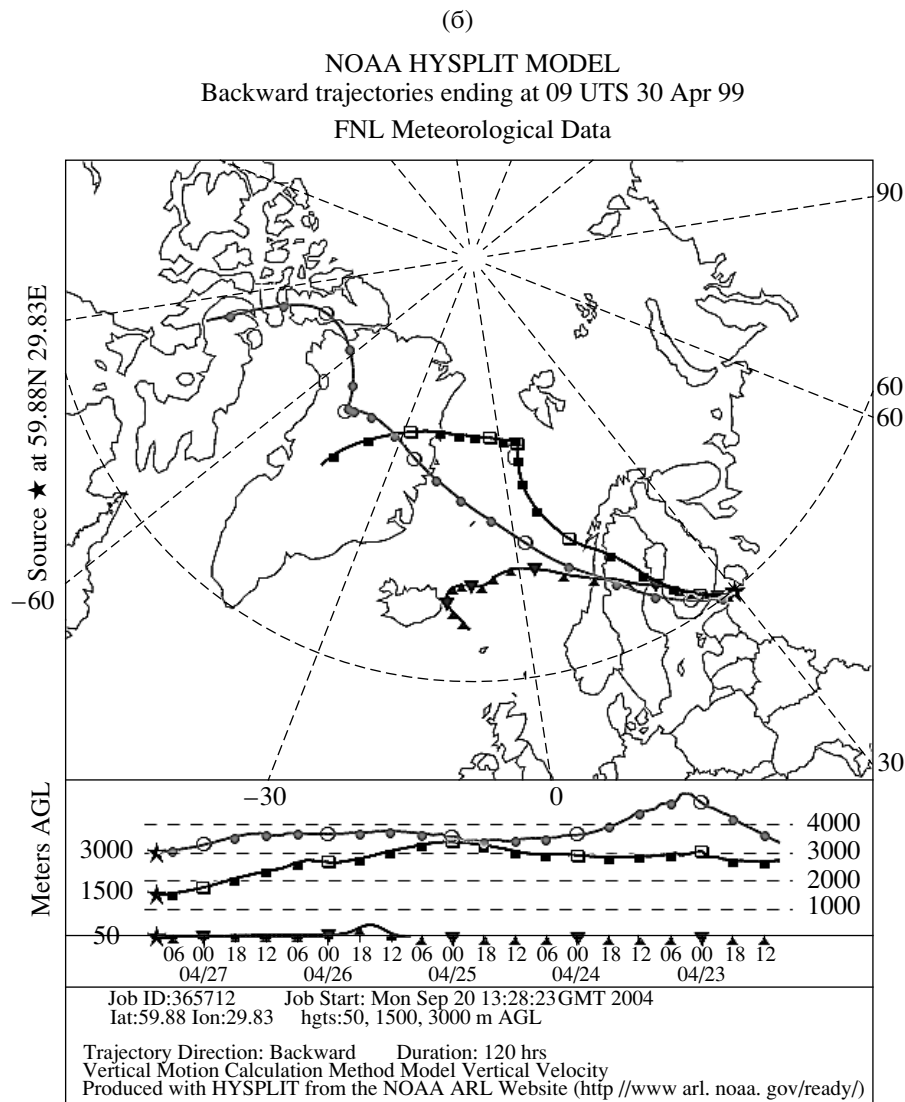


Рис. 9. Окончание.

Расчеты ОСМ, выполненные с постоянным по пространству верхним граничным условием (вариант 1), не отражают вариаций измеренного общего содержания. Значения ОСМ, полученные в модели при использовании верхнего граничного условия по варианту 2, с учетом более низкого содержания метана в воздушной массе, приходящей с запада (сформированной над морем), воспроизводят вариации измеренной величины. Несовпадение измеренных и модельных значений по абсолютной величине свидетельствует о необходимости уточнения верхнего граничного условия модели и величины оценки вклада более высоких слоев атмосферы в общее содержание метана в 1999 г., когда общее содержание метана было ниже, чем в другие годы (рис. 3), а также, возможно, уточнения методики спектроскопических измерений. На рис. 8а приведено рассчитанное по варианту 2

пространственное распределение общего содержания метана в атмосфере над регионом для 24 апреля 1999 г. (см. описание граничных условий модели). Расчет выполнен с использованием варианта Б для интенсивности эмиссии метана с поверхности. На рис. 8б приведено распределение приземной концентрации метана, рассчитанное для того же дня. Рисунок 8 показывает, что в распределении ОСМ (рис. 8а) не проявляется влияние города, характеризующегося максимальными для региона концентрациями метана у поверхности (рис. 8б), однако очевиден вклад воздушной массы, поступающей из районов с низким содержанием метана. Воздушная масса, сформировавшаяся над океанической акваторией, где практически отсутствуют источники метана, характеризуется сравнительно небольшими значениями ОСМ. Примером такой ситуации может быть транс-

формация воздушных масс 27–30 апреля 1999 г., когда ОСМ изменилось от 3.61×10^{19} до 3.34×10^{19} мол см⁻², т.е. на 8%; приземная концентрация при этом возрастала (рис. 7). Анализ обратных траекторий для периода 27–30 апреля показал, что воздушная масса, находившаяся 27 апреля в районе Санкт-Петербурга, в течение предыдущих пяти суток перемещалась над районами материка, где расположены интенсивные источники метана. Изменение направления движения воздушных масс началось 28 апреля и завершилось к 30 апреля, когда в район Санкт-Петербурга уже поступила воздушная масса, сформировавшаяся над океаном (см. рис. 9). При этом наблюдался рост приземных концентраций метана в пос. Воейково. Рост концентрации метана обусловлен приходом воздушной массы из городского сектора. Аналогичная ситуация наблюдалась 22–24 апреля, когда произошла замена воздушных масс, сформировавшихся над Европейским континентом, на океанические воздушные массы.

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Основным фактором, обуславливающим изменчивость приземной концентрации метана в окрестностях Санкт-Петербурга, является эмиссия метана с городской территории. Эта эмиссия в условиях сильно устойчивой стратификации в пограничном слое атмосферы приводит к росту концентрации метана до 1 млн^{-1} (или более чем на 50% по сравнению с условиями интенсивного перемешивания). Удельная эмиссия метана с территорий болотных комплексов в несколько раз слабее, чем с территории города. Вариации приземной концентрации в условиях интенсивного перемешивания, когда вклад местных источников мал, определяются сезонными изменениями и дальним переносом воздушных масс.

Вклад эмиссии с городской территории в ОСМ составляет не более 2%. Происхождение воздушных масс, поступающих в район измерений, определяет наблюдающиеся изменения ОСМ. Для воздушных масс, прошедших над континентальной частью Западной и Восточной Европы, характерно увеличение значений как ОСМ, так и приземных концентраций метана примерно на 4% по сравнению с воздушными массами, поступающими из северо-западного сектора.

Разработанная трехмерная региональная модель переноса примеси в тропосфере удовлетворительно описывает результаты измерений приземных концентраций CH₄ и воспроизводит наблюдаемые изменения общего содержания метана в атмосфере Северо-Западного региона России. Эта модель использована для оценки антропогенной эмиссии метана с территории Санкт-Петербурга. Оценка интегральной эмиссии метана с территории Санкт-Петербурга и его промышленных при-

городов для весеннего сезона составляет около 100 кТ/год. Влияние городской эмиссии на приземную концентрацию метана в Северо-Западном регионе проявляется на расстояниях до 150 км от Санкт-Петербурга.

Разработанная трехмерная региональная модель переноса может быть использована при исследовании процессов формирования полей содержания CH₄ для описания полей концентрации и общего содержания метана в реальном масштабе времени, для оценки интенсивности региональных источников на основе сопоставления модельных значений с результатами измерений, а также для анализа общего содержания метана в атмосфере, получаемого в результате наземных и спутниковых измерений, уточнения вертикальных профилей и ОСМ, получаемых на основе спутниковых данных, учитывая то, что тропосферные слои являются наименее доступными при измерениях из космоса.

Авторы благодарны рецензенту за полезные комментарии и конструктивные предложения, способствовавшие улучшению содержания работы, а также научному редактору за большую работу над литературным стилем статьи.

Авторы выражают признательность NOAA Air Resources Laboratory (ARL) за возможность использования модели HYSPLIT на сайте READY (http://www.arl.noaa.gov/r_eady.html).

Работа выполнена при финансовой поддержке РФФИ грант № 020–56–4711 и частично при поддержке проекта Европейской комиссии EVK2-CT2–0020–0175 (Meth-MonitEUr).

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Яговкина С.В., Кароль И.Л., Зубов В.А. и др. Оценки потоков метана в атмосферу с территории газовых месторождений севера Западной Сибири с использованием трехмерной региональной модели переноса // Метеорология и гидрология. 2003. № 4. С. 49–62.
2. Макарова М.В., Поберовский А.В., Тимофеев Ю.М. Спектроскопические измерения общего содержания метана в районе Санкт-Петербурга // Изв. РАН. Физика атмосферы и океана. 2001. Т. 37. № 1. С. 67–73.
3. Парамонова Н.Н., Привалов В.И., Решетников А.И. Мониторинг углекислого газа и метана в России // Изв. РАН. Физика атмосферы и океана. 2001. Т. 37. № 1. С. 38–43.
4. Сметанин Г.Н., Привалов В.И., Решетников А.И., Парамонова Н.И. Газохроматическая установка для прецизионных измерений концентрации метана в атмосфере на фоновом уровне // Тр. Филиала ГГО Научно-исследовательского центра дистанционного зондирования атмосферы. Прикладная метеорология. 2000. Вып. 2 (548). С. 121–130.
5. Draxler R.R., Rolph G.D. HYSPLIT (Hybrid Single-Particle Lagrangian Integrated Trajectory) Model access

- via NOAA ARL READY Website (<http://www.arl.noaa.gov/ready/hysplit4.html>). NOAA Air Resources Laboratory, Silver Spring, MD. 2003.
6. Кашин Ф.В., Арефьев В.Н., Баранов Ю.И. и др. Измерения содержания метана в приземном слое и толще атмосферы // Изв. РАН. Физика атмосферы и океана. 2004. Т. 40. № 3. С. 356–361.
 7. Buchwitz M., de Beek R., Hoel S., Burrows J.P. et al. Carbon monoxide, methane and carbon dioxide columns retrieved from SCIAMACHY by WFM-DOAS: year 2003 initial data set // Atmospheric Chemistry and Physics Discussions. 2005. V. 5. P. 1943–1971.
 8. <http://www.gl.rhul.ac.uk/METH/MonitEUr>.
 9. Климатические характеристики условий распространения примесей в атмосфере // Справочное пособие / Под ред. Э.Ю. Безуглой и М.Е. Берлянда. Л.: Гидрометеоздат, 1983. 328 с.
 10. Zinchenko A.V., Paramonova N.N., Privalov V.I., Reshetnikov A.I. Estimation of methane emissions in the St. Petersburg, Russia, region: An atmospheric nocturnal boundary layer budget approach // J. Geophys. Res. 2002. V. 107. № D20. P. 4416, doi:10.1029/2001JD001369.
 11. Зинченко А.В., Парамонова Н.Н., Привалов В.И., Решетников А.И. Оценка эмиссии метана в районе Санкт-Петербурга на основе данных измерений его концентрации в приземном слое атмосферы // Метеорология и гидрология. 2001. № 5. С. 35–49.
 12. Парамонова Н.Н., Привалов В.И., Решетников А.И. Изменения концентрации углекислого газа и метана на фоновых станциях России // Обзор загрязнения природной среды в Российской Федерации за 2003 г. СПб: Гидрометеоздат, 2004. С. 123–129.
 13. Global Atmosphere Watch. World Data Center for Greenhouse Gases. March 2003. № 9. <http://gaw.kishow.go.jp/wdogg.html>.
 14. Lowry D., Nisbet E.G., Rata N.D., Holmes C.W. Isotopic analysis of St. Petersburg air at Royal Holloway / Development and Testing of an Advanced Approach to Quantitative Estimation of Russian Methane Emissions (INTAS-RFBR 950–696). Final report. 1999. P. 62–70.
 15. www.cmdl.noaa.gov/cgvr/resources/s/w/c/cgvu.
 16. Кашин Ф.В., Каменогородский Н.Е., Гречко Е.И. и др. Сравнение различных методик наземных спектроскопических измерений общего содержания метана в атмосфере // Изв. РАН. Физика атмосферы и океана. 2001. Т. 37. № 3. С. 339–345.
 17. Notholt J., Toon G., Stordal F. et al. Seasonal variations of atmospheric trace gases in the high arctic at 79° N // J. Geophys. Res. 1997. V. 102. № D11. P. 12855–12861.
 18. Nilsson M., Mikkela C., Sundh I. et al. Methane emission from Swedish mires: National and regional budgets and dependence on mire vegetation // J. Geophys. Res. 2001. V. 106. № D18. P. 20847–20860.
 19. Hargreaves K.J., Fowler D., Pitcairn C.E.R., Aurela M. Annual methane emission from Finnish mires estimated from eddy covariance campaign measurements // Theor. Appl. Climatology. 2001. V. 70. P. 203–213.
 20. Christensen T.R., Ekberg A., Strom L. et al. Factors controlling large scale variations in methane emissions from wetlands // J. Geophys. Res. Lett. 2003. V. 30. № 7. P. 671–674.
 21. <http://data.ecmwf.int/data/>.
 22. Tohjima Y., Wakita S., Maksyutov S. et al. Distribution of tropospheric methane over Siberia in July 1993. // J. Geophys. Res. 1993. V. 102. № D11. P. 25371–25382.
 23. Егорова Т.А., Розанов Е.В., Зубов В.А., Кароль И.Л. Модель для исследования трендов озона (МЕЗОН) // Изв. РАН. Физика атмосферы и океана. 2003. Т. 39. № 3. С. 310–326.
 24. Patra P.K., Lal S., Venkataramani S., Chand D. Halogen Occultation Experiment (HALOE) and balloon-borne in situ measurements of methane in stratosphere and their relation to the quasi-biennial oscillation (QBO) // Atmos. Chem. Phys. 2003. V. 3. P. 1051–1062. www.atmos-chem-phys.org/acp/3/1051/.