

Анализ возможностей нейронных сетей при IPDA космическом зондировании CO₂ с привлечением разнородных априорных данных

Г.Г. Матвиенко, А.Я. Суханов, С.В. Бабченко*

*Институт оптики атмосферы им. В.Е. Зуева СО РАН
634055, г. Томск, пл. Академика Зуева, 1*

Поступила в редакцию 12.09.2018 г.

Анализируется возможность восстановления с помощью нейронной сети средней относительной концентрации углекислого газа, а также профиля концентрации при зондировании с космической орбиты 450 км и с аэростата на высотах 23 и 10 км. Рассмотрены возможности по привлечению априорных данных о температуре, давлении, отраженном и рассеянном сигналах. Погрешности восстановления средней концентрации составляют 0,15 и 0,5% на высотах менее 2 км для лидара с диаметром приемного зеркала 1 м, энергией в импульсе 50 мДж при разрешении 60 км.

Ключевые слова: атмосфера, космический лидар, углекислый газ, парниковый газ, нейронная сеть; atmosphere, spaceborne lidar, carbon dioxide, greenhouse gas, neural network.

Введение

В последние годы в атмосфере Земли резко возросла концентрация углекислого газа и метана. Серьезные усилия мирового научного сообщества направлены на измерение концентрации этих парниковых газов и определение их источников. Развиваются как наземные и самолетные, так и системы глобального спутникового мониторинга, среди которых наибольшее распространение получили пассивные средства контроля. Кроме глобальных методов спутникового мониторинга газов с помощью пассивных систем измерений, планируется создание активных лидарных систем космического базирования [1–9].

С помощью всех существующих пассивных методов определения концентрации парниковых газов проводятся трассовые интегральные измерения, в основном днем. Так, ОСО-2 (Orbiting Carbon Observatory 2 NASA — орбитальная система слежения за углеродом) работает в составе так называемого дневного поезда. Порядок точности ОСО-2 составляет 0,3%, что при концентрации 400 ppm дает абсолютную ошибку 1,2 ppm. Проводимые различными коллективами ученых численные расчеты для возможных космических лидарных систем дают в среднем результаты не хуже. В одной из

первых статей [1], посвященных созданию космического бортового IPDA-лидара на двух длинах волн для зондирования CO₂, зарубежными авторами были рассмотрены возможности восстановления приповерхностной концентрации парниковых газов (CO₂, CH₄ и N₂O). Приводимые в статье технические характеристики космического лидара (соответственно 40 и 9 мДж в импульсах; 1,5 м диаметр телескопа) на высоте 450 км позволяют восстанавливать среднюю концентрацию углекислого газа с ошибкой 0,2%. Однако в указанной работе не рассмотрено влияние на ошибку высотного поведения профиля концентрации газа.

В настоящее время эти исследования продолжают, и множество из них связано с созданием лидарных систем зондирования парниковых газов с бортов как самолетов, так и космических аппаратов [2–6]. Например, центр космических полетов Годдарда NASA продолжает создавать самолетные лидары для измерения средней концентрации CO₂. В работе [2] рассматриваются измерения самолетного лидара с высот 11–13 км при зондировании до верхней кромки облаков на высотах 8–10 км, где присутствуют перьевые облака, и на высотах до 2 км, где присутствуют кучевые; приводятся результаты экспериментов в ходе полетов за 2011, 2013, 2014 гг. В лидаре используется настраиваемый лазер: 30 длин волн; район линии поглощения 1572,335 нм; ширина каждой линии 0,0005 см⁻¹; частота излучения 10 кГц. Данная система разрабатывается как один из прототипов для космического лидара.

* Геннадий Григорьевич Матвиенко (mgg@iao.ru); Александр Яковлевич Суханов (say@iao.ru); Светлана Владимировна Бабченко (bsv@iao.ru).

Китайская народная республика также планирует создание IPDA–CO₂ космического лидара. В [3] анализируются ошибки восстановления средней концентрации подобным лидаром и приводятся оптимальные технические характеристики системы. Для рассматриваемых территорий проведения измерений указывается ошибка от 0,3 до 0,5%, что для средней концентрации в 400 ppm составляет ошибку до 2 ppm. Размер зеркала телескопа (диаметр) выбран равным 1 м, энергия в импульсе 75 мДж, частота 20 Гц, разрешение 50 км, длина волн 1572,024 и 1572,084 нм. Высота орбиты, в отличие от работы [1], составляет 450 и 705 км, рассматриваемые отражательные способности 0,3 и 0,05.

Продолжаются работы, связанные с франко-германским проектом лидара Merlin, предназначенного для зондирования метана с борта космического аппарата [4]. Запуск лидара запланирован на 2021–2022 гг. [4] (случайная ошибка определения средней концентрации метана ~22–27 ppb, орбита 500 км, энергия в импульсе 9,5 мДж, частота 20 Гц, диаметр телескопа 69 см). Японское аэрокосмическое агентство JAXA также разрабатывает самолётные лидары для зондирования CO₂ [5], ими рассмотрены ошибки лидара при зондировании с высот порядка 10 км в сравнении с данными прямых измерений (средняя ошибка 1,5 ppm, максимальная 4 ppm). Используется система гетеродинного приема на двух длинах волн (1572,992 и 1573,193 нм) с частотами модуляции 10 и 11 кГц; приемное зеркало 11 см, мощность излучателя 1,2 Вт. Кроме того, рассматриваются системы для зондирования CO₂ на длинах волн в районе 2,05 мкм [6].

В 2017 г. авторы работы [1] исследовали возможности обнаружения лидаром космического базирования источников и стоков углекислого газа и метана [7]. В [1] моделируется IPDA-система с лазером с энергией в импульсе до 2 мДж и частотой повторения 500 Гц; высота орбиты 500 км, отражательная способность поверхности 0,1 стр⁻¹, рассматривается идеальный детектор с нулевым темновым током и диаметром приемного зеркала 0,7 м. Минимальная относительная ошибка может достигать 5% (20 ppm). По нашим оценкам возможно восстанавливать координаты источников CO₂ мощностью до 634 кг/с, при этом для моделирования высотный ход относительной концентрации углекислого газа берется постоянным – 410 ppm.

Исследования в данном направлении ведутся и в России, в Институте оптики атмосферы им. В.Е. Зуева, начиная с 2010 г. [8]. В нашей работе [9] рассматриваются влияние ошибки многократного рассеяния, а также возможности многоволнового зондирования углекислого газа и метана с борта космического аппарата с помощью IPDA-лидара, но при этом так же, как и в работах авторов [1, 3], не учитывается высотный ход профиля концентрации газа. В [10] нами предложены методики решения обратных задач восстановления профилей кон-

центрации газов при IPDA–DIAL-зондировании с борта аэростата на высоте 23 км с использованием как генетических алгоритмов, так и нейронных сетей (НС). Сравнение со стандартными подходами показало преимущество методов вычислительного интеллекта. При этом технология НС дала наилучшие результаты, в том числе по возможностям привлечения априорных данных, которые в [10] не анализировались. Настоящая работа направлена на исправление этого упущения.

В основном НС используются при пассивном зондировании (см. обзоры в [11]). С 2016 г. стали появляться публикации зарубежных авторов о привлечении НС именно в лидарном зондировании [12, 13]. Мы такие исследования проводим с 2002 г. В начале своего становления НС имели сейчас уже широко известные проблемы в обучении методом обратного распространения ошибки [14, 15], например угасание градиента к первому слою. Это способствовало созданию алгоритма предобучения НС. Один из таких алгоритмов разработан нами на основе псевдообратных матриц как для ускорения обучения, так и повышения качества работы сети для определенных задач [11, 14–17].

В настоящее время существует большое количество рекомендаций по использованию НС, готовых библиотек по глубокому обучению, а также по работе с НС (deeplearning4j, keras, pylearn2 и др.). Многие методы реализованы в стандартных наборах библиотек математических пакетов для научных вычислений. Таким образом, существенных проблем с использованием и привлечением данной технологии для широкого класса задач уже нет. Тем не менее анализ возможностей сетей в конкретной предметной области является важной проблемой, в том числе в решении обратных задач лидарного зондирования.

Моделирование и описание результатов

Как и в [10], в данной статье рассматривается гипотетический лидар с лазерами на длинах волн on и off (1572,025 и 1572,185 нм), наиболее близких к длинам волн, которые выбраны для лидаров космического и самолётного базирования [2–4]. Первая длина волны сдвинута относительно центра линии поглощения с учетом большего вклада дифференциального поглощения на нижних высотах [1, 8, 9] с целью более точного восстановления на нижних высотах. Лидар измеряет отраженное от поверхности Земли и рассеянное в атмосфере излучение. Основные параметры лидара в схеме численного эксперимента приводятся в табл. 1. Профили концентрации CO₂, как в [10], учитываются по данным измерений [18]. Сведения о давлении и температуре за несколько лет (2012–2016 гг.) для атмосферной модели взяты из NRLMSISE-00 Model 2001 [19, 20]. Для других газов брали стандартную модель ИОА СО РАН [21]. В качестве оптической аэрозольной модели использовалась

модель Крекова–Рахимова [22]. Приповерхностная относительная концентрация CO_2 изменяется в пределах от 360 до 415 ppm. На каждый сигнал накладывается нормальный шум, соответствующий отношению сигнал-шум при учете дробовых и тепловых шумов, после чего решается обратная задача [10]. Расчет коэффициентов поглощения, как и в [10], осуществлен с использованием контура Фойгта, но программа вычислений переписана с возможностью распараллеливания на графической карте с помощью технологии OPENCL, что сократило время расчета обучающих и тестовых выборок в 5–6 раз.

Таблица 1

Параметры лидарной системы	
Параметр	Значение
Энергия импульса, Дж	0,05; 0,1
Длительность импульса, нс	30
Угол расхождения лазерного излучения, мрад	0,1
Угол приемника, мрад	0,2
Высота, км	10; 23; 450
Радиус приемного телескопа, м	0,5
Количество импульсов накопления	400
Ширина фильтра, нм	1
Коэффициент отражения, стр^{-1}	0,08
Эффективная высота отражения сигнала, м	50; 100
Энергетическая яркость солнечного излучения, $\text{мВт}/\text{м}^2$ нм	5

Далее на примерах сигналов и различных атмосферных ситуациях осуществляется обучение НС с привлечением алгоритма предобучения на основе псевдообратных матриц и алгоритма обратного распространения ошибки. При оценке возможностей восстановления в качестве входов сети рассматриваются данные по отраженным сигналам, данные по рассеянным DIAL-сигналам, профили давления и температуры (т.е. самый полный набор имеющихся априорных данных).

В качестве обучающих взяты 5000 примеров и в качестве тестовых – 5000. Тестовые примеры созданы отдельно от обучающей выборки и не включены в нее. Кроме того, используется кросс-проверочная тестовая выборка в 500 примеров, предназначенная для проверки работы сети в процессе обучения. Применяется трехслойная НС с количеством нейронов в первом слое в 2 раза больше количества входов сети, во втором слое – в 2 раза больше, чем в первом, в третьем слое количество нейронов соответствует количеству восстанавливаемых параметров (относительная концентрация по высотам, средняя концентрация и средневзвешенная концентрация). Используется сигмовидная функция активации нейронов. На вход сети подаются отношения мощностей сигналов on к off и off к on, так как эксперименты показывают, что это дает меньшую ошибку восстановления, чем если подавать просто одно из соотношений или использовать отношение сигналов off к on, что обусловле-

но меньшими уровнями сигнала on, очевидно приводящими к большим входным возмущениям.

Входами сети служат отраженные и рассеянные сигналы, давление, профиль температуры до 10 км с шагом 0,5 км.

Если взять высоту эффективной отражательной поверхности, равной 100 м, то средняя ошибка для энергии лазерного импульса 50 мДж составит 0,2 ppm (максимальная 1 ppm) при 10000 импульсах накопления. Таким образом, увеличивая среднюю погрешность до 1 ppm (0,2–0,25%), как в работе [1], количество импульсов можно уменьшить в 25 раз, что составит 400 импульсов, и, соответственно, при частоте 50 Гц можно достичь разрешения 50–60 км. При расчете для системы с 400 импульсами накопления, высотой эффективного отражения 100 м и энергией в импульсе 50 мДж средняя ошибка оказалась равна 0,76 ppm, максимальная 3–4 ppm; для отражательной высоты 50 м средняя ошибка 0,64 ppm (0,15%), а максимальная 3 ppm. Результаты для различных высотных платформ при эффективной высоте отражения 50 м, энергии в импульсе 50 мДж, полосе пропускания 1 нм представлены в табл. 2. Приведены данные по средней относительной концентрации и средней взвешенной относительной концентрации.

Таблица 2

Результаты численного эксперимента по восстановлению относительной концентрации CO_2 (энергия в импульсе 50 мДж, 400 импульсов)

Высота платформы, км	Ошибка средней взвешенной концентрации, ppm	Оценка среднеквадратичного отклонения ошибки	Максимальная ошибка, ppm
450	0,64	0,009	3
23	0,31	0,006	1,5
10	0,125	0,02	1,0

На рис. 1 приводятся средняя и максимальная ошибки восстановления относительной концентрации для разных высот, на которых находится платформа с размещенным на ней лидаром.

Максимальные ошибки на приземных высотах достаточно велики. При этом как наши оценки, так и оценки зарубежных авторов для средней ошибки концентрации по атмосферному столбу достаточно обнадеживающие. Таким образом, если восстановление средней концентрации происходит с приемлемой точностью, то ошибка восстановления относительной концентрации на данной высоте значительно выше, особенно на приземных высотах.

Проведем оценки возможностей НС с привлечением различных априорных данных. Для экспериментов выбрано несколько вариантов, где в качестве основных комбинируемых типов данных выступают профили температуры, давления, отношения рассеянных сигналов on и off (DIAL), отношения двух отраженных сигналов (IPDA).

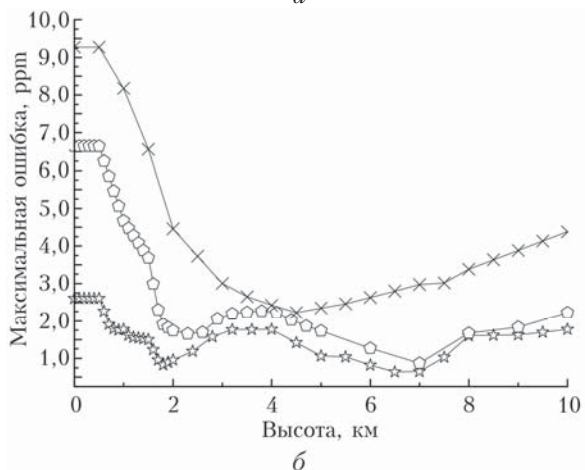
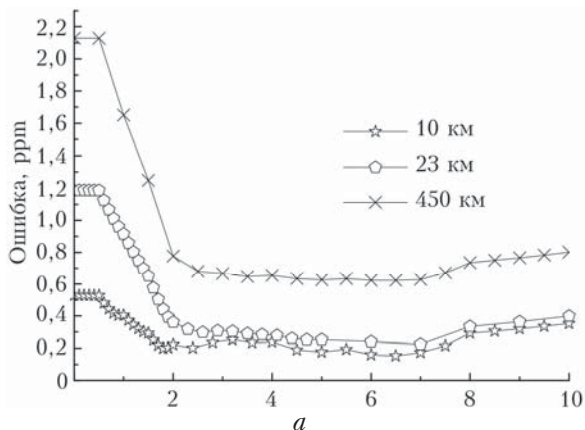


Рис. 1. Средняя (а) и максимальная (б) ошибки восстановления относительной концентрации CO_2 для разных высот

На рис. 2 приведены ошибки работы НС в зависимости от используемого набора восстанавливающих данных. Очевидно, что наилучшие результаты получены для ситуации, когда используются и IPDA-, и DIAL-сигналы, а также давление и температура по всем высотам. При этом величины погрешностей в численных экспериментах, где используется профиль давления и температуры, и там, где используется только давление на поверхности и профиль температуры, а также только профиль давления практически совпадают (~2,15 ppm на поверхности). Чуть хуже результаты (2,3 ppm на поверхности) получены для случая, в котором используются только профиль температуры и сигналы. Самые плохие результаты получены при использовании сигнала IPDA либо сигнала IPDA совместно с сигналом DIAL. Самый худший результат получается при использовании только DIAL-сигнала, даже вместе с профилем температуры и профилем давления – ошибка приповерхностной относительной концентрации 7 ppm. Таким образом, использование DIAL-сигнала при зондировании с космической платформы не имеет смысла.

Также приводится сравнение с попыткой восстановления профилей относительной концентрации CO_2 по профилям давления и температуры (самая большая ошибка, рис. 2, в, PT) с группировкой типов входных данных по уровню ошибки от самой большой до самой маленькой.

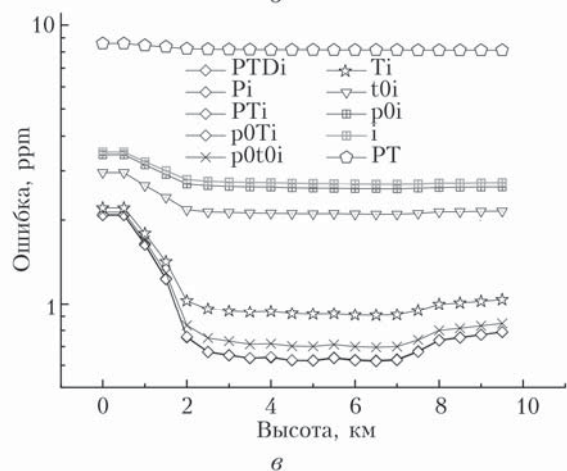
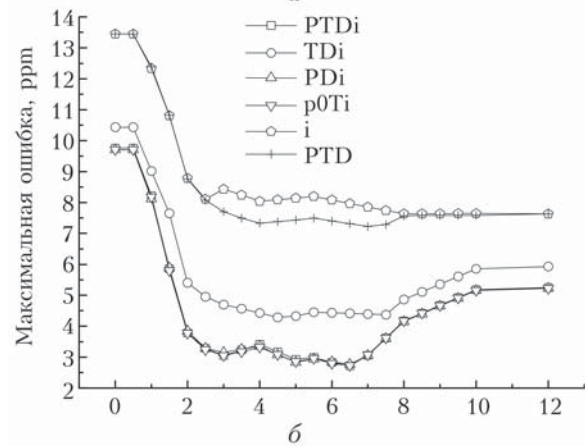
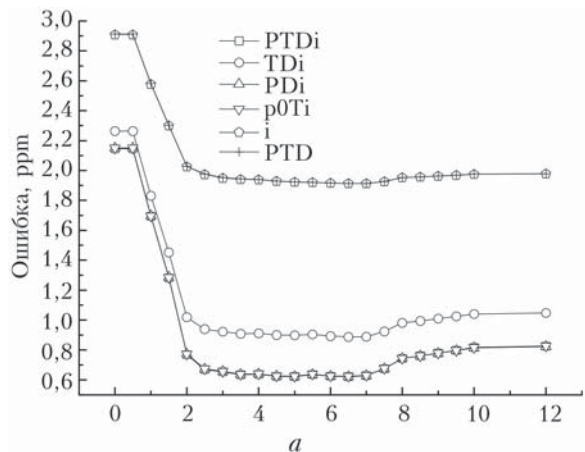


Рис. 2. Абсолютные средние (а) и максимальные (б) ошибки восстановления профилей относительной концентрации углекислого газа при зондировании с высоты 450 км; функции погрешностей в порядке убывания ошибки в различных экспериментах в зависимости от используемых априорных данных (в). Практически совпадающие данные по погрешностям в различных экспериментах обозначены одинаково ромбом, заглавными буквами обозначен профиль по высотам, строчными – одно значение на высоте (P – профиль давления, T – профиль температуры, D – профиль отношения DIAL-сигналов, i – отношение двух IPDA-сигналов)

Анализируя рисунок, можно определить, что результаты вполне согласованы. Очевидно, что только по давлению и температуре проблематично

определить концентрацию с высокой точностью (пятиугольники), повышение точности происходит при использовании либо IPDA-сигнала, либо IPDA-сигнала с добавлением приповерхностного давления (средний результат — два практически совпадающих графика, обозначенных квадратом с крестом внутри; добавление информации о приповерхностном давлении в данном случае незначительно уменьшает ошибку). Использование только профиля температуры и IPDA-сигнала (T_i) незначительно повышает точность, а использование профиля температуры совместно с приповерхностным давлением и IPDA-сигналом ($p0T_i$) уже заметно улучшает результаты восстановления концентрации. Бесспорно существует высокая корреляция между температурой на разных высотах. В некоторых случаях прибегают к простой оценке изменения температуры на 6°C на каждый километр с высотой. При этом знание просто приповерхностного давления без температуры не дает значительного повышения точности, либо необходимо знание полного профиля давления.

Далее рассмотрим возможности НС для восстановления профилей относительной концентрации CO_2 при зондировании с высот 23 и 10 км (рис. 3).

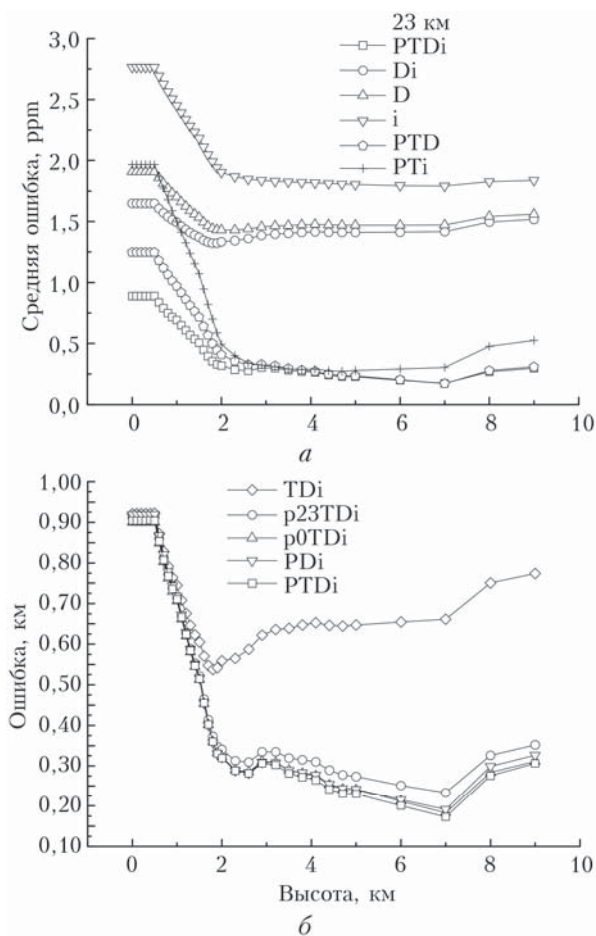


Рис. 3. Ошибки восстановления относительной концентрации CO_2 для разных комбинаций входных данных (а) и при использовании комбинации профилей температуры и давления (б). Обозначения см. на рис. 2

Здесь для сравнения используются примеры, в которых энергия в лазерном импульсе 100 мДж, т.е. в 2 раза выше, чем в предыдущих примерах. Данная проверка показывает, при каких характеристиках можно достичь погрешности менее 1 ppm на приповерхностных высотах при зондировании с высот 23 и 10 км. Зондирование с платформы на высоте 23 км предполагает использование стратосферного аэростата, а на высоте 10 км — самолета или аэростата.

Самые лучшие результаты получены для ситуации, когда известны все априорные данные. При этом средняя ошибка на приповерхностных высотах менее 1–0,8 ppm. Самые худшие результаты достигаются, когда известны только данные по DIAL или только по IPDA-сигналам. Совмещение одновременно сигналов DIAL и IPDA дает лучшие результаты. Использование только DIAL-сигналов дает большую точность по сравнению с использованием только IPDA-сигналов как при добавлении профилей давления и температуры, так и без. Длина лазерного импульса 30 нс, поэтому использование DIAL-сигнала позволяет уменьшить погрешность восстановления профиля концентрации при зондировании с небольших высот. В целом знание априорных данных о профилях давления и температуры повышает точность восстановления концентрации на 1–1,5 ppm по сравнению со случаем, когда эти данные неизвестны. Знание лишь IPDA- или DIAL-сигналов не позволяет восстановить концентрацию с погрешностью менее 1 ppm на приповерхностных высотах, это возможно при использовании всех рассматриваемых данных. На высотах более 2 км при известных профилях давления и температуры погрешности практически идентичны при использовании как отдельно, так и совместно разнотипных сигналов. Применение только профиля температуры увеличивает ошибку (рис. 3, б). Использование давления только на высоте 23 км дает чуть большую ошибку, нежели всего профиля давления и температуры или давления у поверхности Земли. Те же выводы сохраняются для зондирования с высоты 10 км, но погрешность меньше более чем в 2 раза по сравнению с зондированием с высоты 23 км (рис. 4).

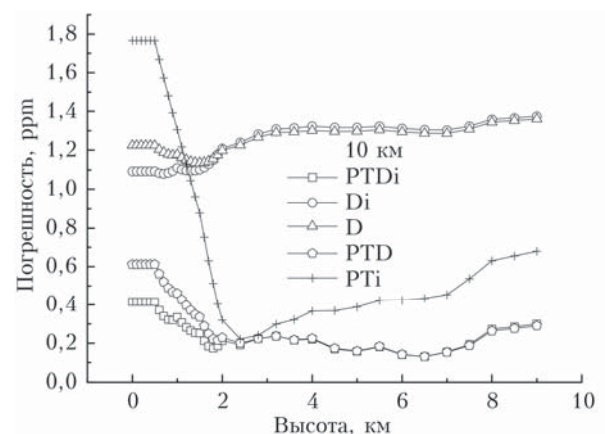


Рис. 4. Погрешности зондирования с высоты 10 км

Таким образом, для систем на высотах 10 км можно уменьшить требования к техническим параметрам более чем в 2 раза.

При использовании только отраженного сигнала погрешность восстановления профиля относительной концентрации CO₂ имеет куда большую, чем при восстановлении средней концентрации. Высотный ход профиля концентрации сильно влияет на погрешность его восстановления и, таким образом, на точность восстановления приповерхностной концентрации углекислого газа, но меньше, чем на погрешность восстановления средней концентрации.

Выводы

Проведенные исследования показывают возможность применения лидаров для измерений CO₂ с борта космической платформы на орбите 450 км с погрешностью восстановления средней относительной концентрации 0,65 ppm, или 0,15–0,16% (что в 2 раза выше, чем возможности OCO-2), при энергии лазера 50 мДж, диаметре приемного зеркала 1 м и 400 импульсах накопления, что при скорости спутника 7,5 км/с соответствует разрешению 60 км. Погрешность относительной концентрации на высотах до 2 км составляет 2 ppm, что обуславливает более строгие требования к техническим характеристикам лидара для получения большей точности на данных высотах. Точность восстановления средней концентрации при зондировании с высот 23 и 10 км при сохранении тех же технических характеристик соответственно выше примерно в 2 и 3 раза.

Применение НС для восстановления концентрации позволяет использовать дополнительную априорную информацию и связывать различные входные и выходные данные между собой. Привлечение априорных данных о профиле давления приводит к существенному повышению точности восстановления. Данные по температуре дают повышение точности, но меньше на 0,2–0,4 ppm, при этом если к данным по профилю температуры добавить данные по приповерхностному давлению, то ошибка фактически сравнима с ошибкой при полном известном профиле давления и температуры (что связано с барометрической зависимостью). При зондировании с высот 23 и 10 км совместное использование сигналов DIAL и IPDA повышает точность результатов по сравнению с использованием их по отдельности. При зондировании с борта космической платформы нецелесообразно использовать DIAL-сигнал. Для более точных измерений достаточно знания профиля давления или профиля температуры и значения давления на какой-либо приповерхностной высоте.

1. *Ehret G., Kiemle C., Wirth M., Amediek A.* Spaceborne remote sensing of CO₂, CH₄, and N₂O by integrated path absorption lidar: a sensitivity analysis // *Appl. Phys.* 2008. V. 90. P. 593–608.

2. *Jianping Mao, Anand Ramanathan, James B. Abshire, Stephan R. Kawa, Haris Riris, Graham R. Allan, Michael Rodriguez, William E. Hasselbrack, Xiaoli Sun, Kenji Numata, Jeff Chen, Yonghoon Choi, Mei Ying, Melissa Yang.* Measurement of atmospheric CO₂ column concentrations to cloud tops with a pulsed multi-wavelength airborne lidar // *Atmos. Meas. Tech.* 2018. N 11. P. 127–140. 2018. URL: <https://doi.org/10.5194/amt-11-127-2018> (last access: 17.09.2018).

3. *Ge Han, Xin Ma, Ailin Liang, Tianhao Zhang, Yanan Zhao, Miao Zhang, Wei Gong.* Performance evaluation for China's planned CO₂-IPDA // *Remote Sens.* 2017. N 9. P. 768–789.

4. *Ehret G., Bousquet P., Pierangelo C., Alpers M., Millet B., Abshire J.B., Bovensmann H., Burrows J.P., Chevallier F., Ciais P., Crevoisier C., Fix A., Flamant P., Frankenberg Ch., Gibert F., Heim B., Heimann M., Houweling S., Hubberten H.W., Jöckel P., Law K., Löw A., Marshall J., Agusti-Panareda A., Payan S., Prigent C., Rairoux P., Sachs T., Scholze M., Wirth M.* MERLIN: A French-German space lidar mission dedicated to atmospheric methane // *Remote Sens.* 2017. N 9. P. 1052–1081.

5. *Sakaizawa D., Kawakami S., Nakajima M., Tanaka T., Morino I., Uchino O.* An airborne amplitude-modulated 1.57 μm differential laser absorption spectrometer: simultaneous measurement of partial column-averaged dry air mixing ratio of CO₂ and target range // *Atmos. Meas. Tech.* 2013. N 6. P. 387–396.

6. *Menzies R.T., Spiers G.D., Jacob J.* Airborne laser absorption spectrometer measurements of atmospheric CO₂ column mole fractions: Source and sink detection and environmental impacts on retrievals // *J. Atmos. Ocean. Tech.* 2014. V. 31 P. 404–421.

7. *Kiemle C., Ehret G., Amediek A., Fix A., Quatrevalet M., Wirth M.* Potential of spaceborne lidar measurements of carbon dioxide and methane emissions from strong point sources // *Remote Sens.* 2017. V. 9, N 11. P. 1137–1153.

8. *Matvienko G.G., Krekov G.M., Sukhanov A.Ya.* Spaceborne remote sensing of greenhouse gases by IPDA lidar: A potentialities estimate // 25th Intern. Laser Radar Conf. St.-Petersburg, 2010. P. S11P-02.

9. *Бабченко С.В., Матвиенко Г.Г., Суханов А.Я.* Оценки возможностей зондирования парниковых газов CH₄ и CO₂ над подстилающей поверхностью IPDA лидаром космического базирования // *Оптика атмосферы и океана.* 2015. Т. 28, № 1. С. 37–45; *Babchenko S.V., Matvienko G.G., Sukhanov A.Ya.* Assessing the possibilities of sensing CH₄ and CO₂ greenhouse gases above the underlying surface with satellite-based IDPA lidar // *Atmos. Ocean. Opt.* 2015. V. 28, N 3. P. 245–253.

10. *Суханов А.Я.* Решение обратной задачи DIAL-IPDA аэрокосмического лидарного зондирования углекислого газа на основе бионических методов. // *Оптика атмосф. и океана.* 2017. Т. 30, № 7. С. 589–597.

11. *Суханов А.Я.* Алгоритмы, методы и комплексы программ для решения задач лидарного зондирования атмосферы: дис. ... канд. техн. наук. Томск: ТУСУР, 2006. 151 с.

12. *Mamun M.M., Müller D.* Retrieval of intensive aerosol microphysical parameters from multiwavelength Raman/HSRL lidar: Feasibility study with artificial neural networks // *J. Atmos. Meas. Tech. Discuss.* 2016. 46 p. DOI: 10.5194/amt-2016-7.

13. *Berdnik V.V., Loiko V.A.* Neural networks for aerosol particles characterization // *J. Quant. Spectrosc. Radiat. Transfer.* 2016. V. 184. P. 135–145.

14. Креков Г.М., Крекова М.М., Лисенко А.А., Суханов А.Я. Идентификация малых патогенных примесей в атмосфере на основе метода искусственных нейронных сетей // XV рабочая группа «Аэрозоли Сибири». Томск, 2008. С. 41.
15. Суханов А.Я. Об алгоритме предобучения нейронной сети для ряда обратных задач лидарного зондирования [Электронный ресурс] // Оптика атмосф. и океана. Физика атмосферы: сб. докл. XXII Междунар. симп. Томск: Изд-во ИОА СО РАН, 2016. С. С45–С48. 1 электрон. опт. диск (CD-ROM).
16. Суханов А.Я., Креков Г.М. Распознавание спектров флуоресценции бактерий и полиароматических углеводородов // Математические методы распознавания образов: сб. докл. всерос. конф., Петрозаводск, 2011 г. М.: МАКС Пресс, 2011. С. 514–517.
17. Суханов А.Я., Катаев М.Ю. Возможности метода нейронных сетей для восстановления профиля концентрации озона из лидарных данных // Оптика атмосф. и океана. 2003. Т. 16, № 12. С. 1115–1119.
18. Аршинов М.Ю., Белан Б.Д., Давыдов Д.К., Креков Г.М., Фофанов А.В., Бабченко С.В., Иноуе Г., Machida T., Maksutov Sh., Sasakawa M., Shimoyama K. Динамика вертикального распределение парниковых газов в атмосфере // Оптика атмосф. и океана. 2012. Т. 25, № 12. С. 1051–1061.
19. Labitzke K., Barnett J.J., Edwards B. Handbook MAP 16. SCOSTEP. 1985. 320 p.
20. Hedin A.E. Extension of the MSIS Thermospheric model into the middle and lower atmosphere // J. Geophys. Res. 1991. V. 96, iss. A2. P. 1159–1172.
21. Комаров В.С. Статистические модели температуры и газовых компонент атмосферы. Л.: Гидрометеониздат, 1986. 264 с.
22. Балин Ю.С., Боровой А.Г., Бурлаков В.Д., Долгий С.И., Клемашева М.Г., Коношонкин А.В., Коханенко Г.П., Кустова Н.В., Марицев В.Н., Матвиенко Г.Г., Невзоров А.А., Невзоров А.В., Пеннер И.Э., Романовский О.А., Самойлова С.В., Суханов А.Я., Харченко О.В., Шишко В.А. Лидарный мониторинг облачных и аэрозольных полей, малых газовых составляющих и метеопараметров атмосферы / под ред. Г.Г. Матвиенко. Томск: Изд-во ИОА СО РАН. 2015. 450 с.

G.G. Matvienko, A.Ya. Sukhanov, S.V. Babchenko. Analysis of neural network capabilities in IPDA spaceborne lidar sensing of CO₂ using heterogeneous *a priori* data.

A possibility of retrieving the columnar concentration of carbon dioxide using a neural network is analyzed, as well as the concentration profile when sounding from a space orbit of 450 km and from an aerostat at altitudes of 23 and 10 km. Possibilities of using *a priori* data on temperature, pressure, and reflected and scattered signals are considered. The errors of retrieval of the columnar CO₂ are 0.15% and 0.5% at altitudes lower than 2 km for lidar with a telescope diameter of 1 m and laser pulse energy of 50 μJ at a resolution of 60 km.