

Определение относительного содержания атмосферного HDO по данным одновременных измерений спутника GOSAT-2 в тепловом и ближнем ИК диапазонах

Задворных И.В.^(1*), Грибанов К.Г.⁽¹⁾, Захаров В.И.⁽¹⁾, Имасу Р.⁽²⁾

⁽¹⁾ Уральский федеральный университет, Екатеринбург, Россия

⁽²⁾ Университет Токио, Токио, Япония

ilia.zadvornyh@urfu.ru

Аннотация

В работе продемонстрировано применение метода решения обратной задачи гиперспектрального спутникового зондирования по определению вертикального профиля отношения $\text{HDO}/\text{H}_2\text{O}$ в атмосфере Земли с одновременным использованием спектров теплового и ближнего ИК диапазонов. Проведено определение вертикального профиля относительного содержания изотополога HDO (δD) в атмосферном водяном паре по данным измерений спутникового ИК-спектрометра TANSO-FTS/GOSAT-2 и сравнение восстановленных значений со данными наземных дистанционных измерений. Выявлена заметная корреляция между среднемесячными значениями δD вблизи станции, входящей в измерительную сеть TCCON.

δD

Величину соотношения принято представлять в виде величины δD – изменения отношения содержания менее распространенного HDO к наиболее основному H₂O, отнесенного к их стандартному отношению:

$$\delta D = \left[\frac{(HDO/H_2O)}{R_{std}} - 1 \right] \cdot 1000 \text{ ‰}$$

где R_{std} – отношение HDO/H₂O по стандарту SMOW (Standard Mean Ocean Water), равное 3.115210×10^{-4} .

Метод

Прямая модель (Rodgers, 2000):

$$\begin{bmatrix} y_T \\ y_N \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} F_T(x) \\ F_N(x) \end{bmatrix} + \begin{bmatrix} \varepsilon_T \\ \varepsilon_N \end{bmatrix}$$

где y – измеренный спектр, x – вектор состояния атмосферы, $F_T(x)$, $F_N(x)$, ε_T , ε_N – прямые модели и ошибки измерения теплового (T) и ближнего (N) ИК диапазонов.

В ПО реализован алгоритм решения, основанный на статистическом методе оптимального оценивания, сводящийся к минимизации целевой функции:

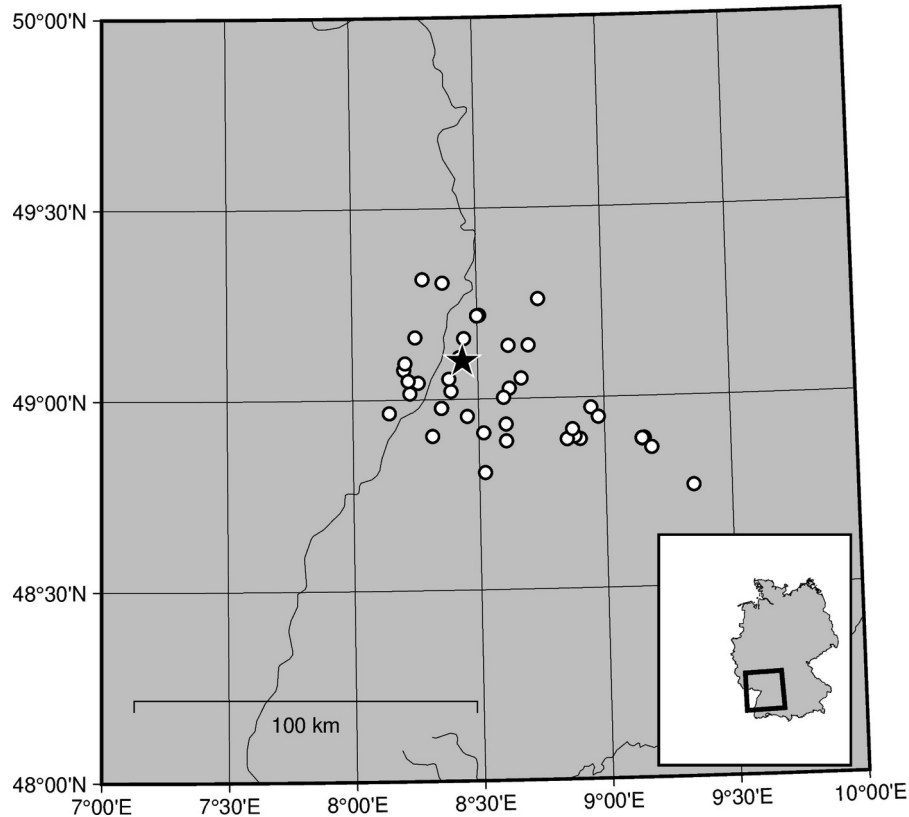
$$J(x) = [y_T - F_T(x)]^T S_T^{-1} [y_T - F_T(x)] + [y_N - F_N(x)]^T S_N^{-1} [y_N - F_N(x)] + [x - x_a]^T S_a^{-1} [x - x_a]$$

Минимизируется осуществляется методом Гаусса-Ньютона по итеративной формуле:

$$x_{i+1} = x_i + (K_i^T S^{-1} K_i + S_a^{-1})^{-1} [K_i^T S^{-1} (y - F(x_i)) - S_a^{-1} (x_i - x_a)]$$

где $K_i = K(x_i)$ представляет собой матрицу Якоби, которая состоит из производных прямой модели, S_T , S_N – ковариационная матрица ошибок измерения.

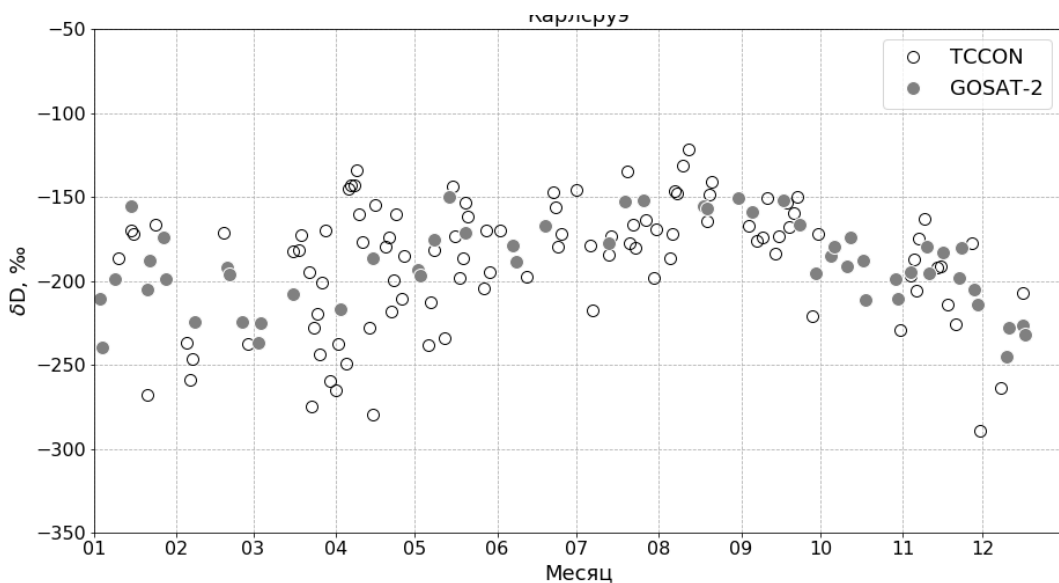
Отобранные измерения GOSAT-2 в безоблачной атмосфере вблизи наземной станции TCCON Карлсруэ за период январь-декабрь 2020 г.



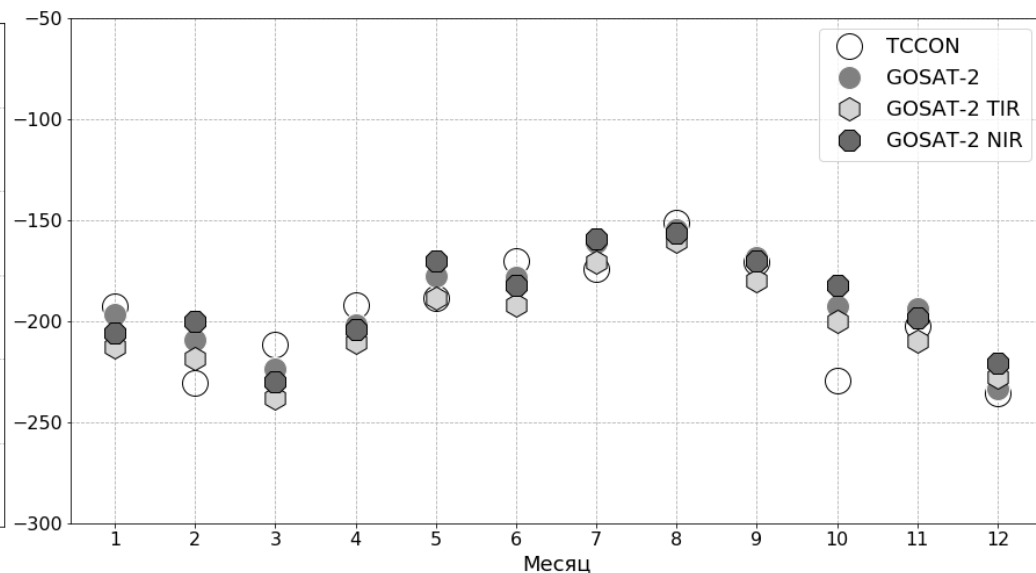
Японский спутник второго поколения GOSAT-2 был запущен в 2018 году для продолжения исследований глобального распределения парниковых газов в атмосфере Земли. Расположенный на борту Фурье-спектрометр TANSO-FTS-2 со спектральным разрешением 0.2 см^{-1} осуществляет одновременные измерения в 5 спектральных интервалах: $700\text{-}1188$, $1188\text{-}1800 \text{ см}^{-1}$ теплового ИК и $4200\text{-}5200$, $5900\text{-}6400$, $12950\text{-}13250 \text{ см}^{-1}$ ближнего ИК, которые подходят для определения $\text{HDO}/\text{H}_2\text{O}$.

Для сравнения с данными наземных измерений были отобраны спутниковые измерения за 2020 год для целевой области вблизи наземной измерительной станции TCCON в г. Карлсруэ (Германия) в радиусе 100 км. На рисунке слева показана карта спутниковых наблюдений при безоблачном небе вблизи наземной станции TCCON.

Сравнение значений δD GOSAT-2 и TCCON

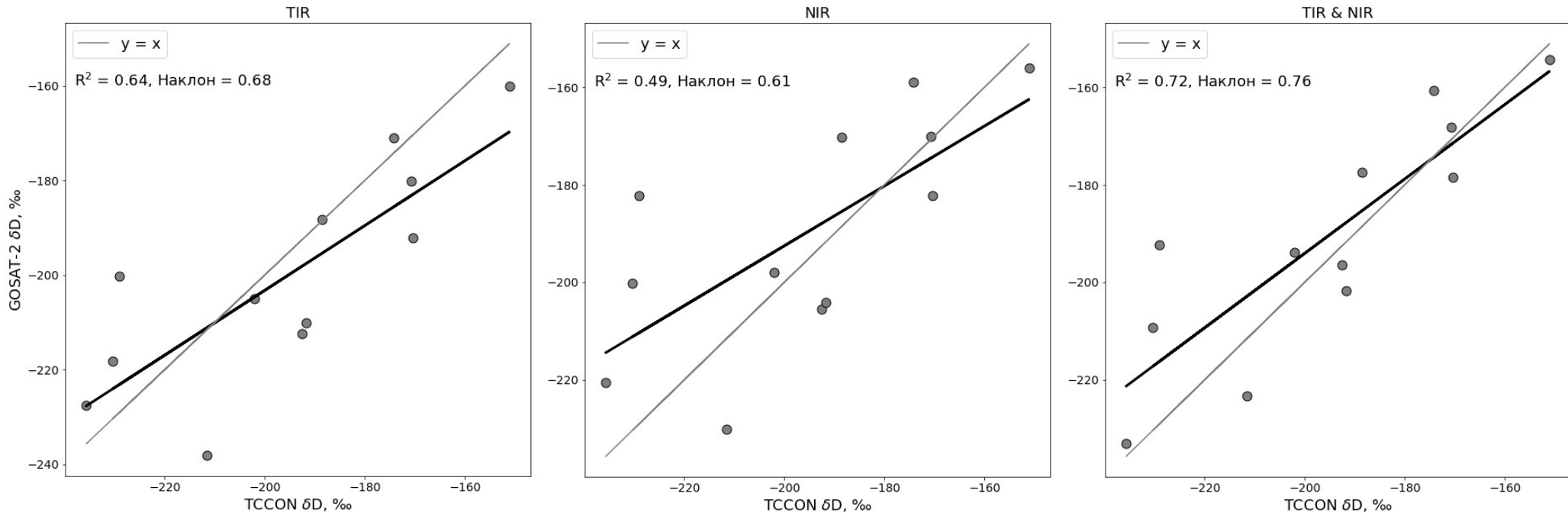


Сравнение значений δD , полученных из измерений TCCON и GOSAT-2 за 2020 год. Данные представлены в виде средних значений за день.



Сравнение среднемесячных значений δD , полученных из измерений TCCON и GOSAT-2 за 2020 год с использованием только теплового диапазона (TIR), ближнего ИК диапазона (NIR) и обоих диапазонов совместно (GOSAT-2)

Диаграммы рассеяния среднемесячных значений δD (TCCON vs. GOSAT-2). Графики приведены для разных диапазонов: для теплового (TIR), ближнего ИК (NIR) и обоих диапазонов совместно (TIR & NIR)



Среднемесячные значения вблизи Карлсруэ показывают хорошую корреляцию с коэффициентом 0.85 (коэффициент детерминации $R^2 = 0.72$), между среднесуточными значениями он составляет 0.73. Коэффициент наклона при приближении к прямой равен 0.76. Данные среднемесячных концентраций δD , полученных с использованием ИК диапазонов по отдельности, показали корреляцию ниже: коэффициент 0.80 (коэффициент детерминации $R^2 = 0.64$) при использовании только теплового ИК; коэффициент 0.70 (коэффициент детерминации $R^2 = 0.49$) при использовании только ближнего ИК.

Заключение

Проведено восстановление среднего относительного содержания HDO (δD) в атмосферном столбе с применением метода одновременного обращения спектров теплового и ближнего ИК спутника GOSAT-2.

Проведено сравнение восстановленных значений с данными наземных дистанционных измерений станций TCCON, расположенных в Карлсруэ (Германия) за 2020 год. Значения среднемесячных результатов восстановления GOSAT-2 вблизи наземной станции в Карсруэ показывают хорошее совпадение с коэффициентом корреляции 0.72. В целом, высокая корреляция между наземными и спутниковыми результатами для свидетельствует о достоверности полученных значений.

Работа выполнена в рамках исследований, поддержанных грантом РФФ №18-11-00024-П.