

## Технология оценки валовой первичной продукции по данным спутниковых наблюдений

Ю. И. Шокин<sup>1</sup>, А. А. Лагутин<sup>1,2,\*</sup>, Е. Ю. Мордвин<sup>1,2</sup>, Н. В. Волков<sup>1,2</sup>

<sup>1</sup>Федеральный исследовательский центр информационных и вычислительных технологий, 630090, Новосибирск, Россия

<sup>2</sup>Алтайский государственный университет, 656049, Барнаул, Россия

\*Контактный автор: Лагутин Анатолий Алексеевич, e-mail: lagutin@theory.asu.ru

Поступила 10 ноября 2022 г., доработана 05 декабря 2022 г., принята в печать 12 декабря 2022 г.

Проведено исследование поведения полного содержания углекислого газа в атмосфере степных зон Алтайского края и Новосибирской области. Впервые получены количественные оценки валовой первичной продукции для исследуемых зон. Информационной основой являлись данные орбитальных карбоновых обсерваторий ОСО-2 и ОСО-3 по содержанию  $\text{CO}_2$  и продукт “флуоресценция хлорофилла, индуцированная солнечным светом”. Анализ данных ОСО-2 проводился для периода 2014–2021 гг., результаты ОСО-3 добавлены в обработку с 2019 г. Для описания сезонного цикла содержания  $\text{CO}_2$  в атмосфере использовалась эмпирическая модель, предложенная для интерпретации данных спутника GOSAT и верифицированная по результатам измерений глобальной сети наземных станций TCCON. Установлена скорость роста  $\text{CO}_2$  в атмосфере исследуемых зон. Показано, что валовая первичная продукция за счет переработки атмосферного  $\text{CO}_2$  наземной растительностью достигает максимума в летние месяцы и составляет порядка 10–12 гС/(м<sup>2</sup>·день).

*Ключевые слова:* Алтайский край, Новосибирская область, атмосфера, углекислый газ, валовая первичная продукция, орбитальные карбоновые обсерватории.

*Цитирование:* Шокин Ю.И., Лагутин А.А., Мордвин Е.Ю., Волков Н.В. Технология оценки валовой первичной продукции по данным спутниковых наблюдений. Вычислительные технологии. 2023; 28(2):103–114. DOI:10.25743/ICT.2023.28.2.009.

### Введение

Согласно данным Всемирной метеорологической организации (ВМО), представленным в итоговом бюллетене за 2021 г., с начала индустриальной эры в 1750 г. содержание основного парникового газа — диоксида углерода ( $\text{CO}_2$ ) — в приземном слое атмосферы увеличилось в 1.5 раза, достигнув в 2020 г. новых исторически максимальных значений — около  $413.2 \pm 0.2$  млн<sup>-1</sup> [1]. Анализ данных Глобального углеродного проекта (Global carbon project) за 2021 г. [2] показал, что вырубка лесов и другие изменения, произошедшие в землепользовании в последнюю декаду, привели к увеличению эмиссии  $\text{CO}_2$  до 5.7 Гт $\text{CO}_2$ /год. Рост эмиссии  $\text{CO}_2$  в указанный период обуславливает дисбаланс глобального карбонового бюджета, составляющий –0.3 Гт $\text{CO}_2$ /год [2]. Отметим, что приведенные оценки получены в рамках действующей программы мониторинговых

наблюдений Глобальной службы атмосферы ВМО и участвующих в ней сетей наземных пунктов (распределение пунктов измерений см. в [1]). Несмотря на существенное расширение этой сети в последнее десятилетие, значительные территории поверхности Земли, являющиеся источниками парниковых газов, не контролируются традиционными методами наземной, аэровоздушной и судовой диагностики.

Возможность на регулярной основе получать данные по полному содержанию  $\text{CO}_2$  в атмосфере труднодоступных зон и/или зон с редким покрытием наземными станциями появилась в 2009 г. после запуска спутника GOSAT (Greenhouse gases observing satellite) Японского аэрокосмического агентства JAXA (Japan aerospace exploration agency) [3]. Успех миссии GOSAT стимулировал разработку нового поколения спутниковых приборов для мониторинга атмосферных парниковых газов. В июле 2014 г. агентством NASA была запущена первая специализированная орбитальная карбоновая обсерватория OCO-2 (orbiting carbon observatory) [4, 5], а в мае 2019 г. на борту международной космической станции (МКС) смонтирована обсерватория OCO-3 [6]. Годом ранее JAXA запущен второй спутник программы GOSAT-2.

Ключевым показателем глобального углеродного бюджета является величина валовой первичной продукции региона (gross primary production, GPP), которая определяется по количеству  $\text{CO}_2$ , связанного за конкретный период наземной растительностью в расчете на единицу площади с учетом затрат на дыхание растений. Сегодня спутниковое дистанционное зондирование — основной метод оценки GPP на различных пространственных и временных масштабах [7, 8].

Традиционный метод получения оценок GPP для различных экосистем основан на использовании вегетационных индексов (например, нормализованного вегетационного индекса NDVI или улучшенного индекса EVI), а также биофизических характеристик растительного покрова (содержание хлорофилла; индекс листовой поверхности LAI; доля фотосинтетически активного излучения, поглощаемая растительностью fPAR, и др.). Однако вегетационные индексы, такие как NDVI и EVI, не чувствительны к быстрым изменениям характера протекания процесса фотосинтеза, вызванным вариациями потоков тепла и влаги в окружающей среде (см. работу [7] и ссылки в ней).

Сегодня основным подходом к мониторингу из космоса процесса фотосинтеза и получению оценок GPP на региональном и глобальном уровне является регистрация флуоресцентного излучения хлорофилла, индуцированного солнечным светом (solar-induced chlorophyll fluorescence, SIF). SIF — это флуоресцентное излучение, испускаемое молекулами хлорофилла растений в течение нескольких наносекунд после поглощения солнечного излучения в диапазоне длин волн от 600 до 800 нм. Установленная линейная корреляция между SIF и GPP позволяет получить более точные оценки объема  $\text{CO}_2$ , поглощаемого растениями, по сравнению с использованием вегетационных индексов [8].

Целью работы является установление характера поведения полного содержания углекислого газа в атмосфере степных зон Алтайского края и Новосибирской области в 2014–2021 гг., а также получение количественных оценок GPP с использованием продукта SIF орбитальных карбоновых обсерваторий OCO-2 и OCO-3.

## 1. Спутниковый мониторинг SIF

Первые исследования содержания  $\text{CO}_2$  в атмосфере, основанные на измерениях SIF, стали возможны начиная с 2006 г., после запуска радиометра GOME-2 на борту спутника MetOp-A (Meteorological operational satellite) Европейского космического агент-

ства ESA (European space agency) [9]. Спутник GOSAT, запущенный в 2009 г., также имеет спектральные каналы, позволяющие восстанавливать значения SIF [3]. Однако низкое пространственное разрешение сенсоров этих спутников ( $40 \times 80$  км у GOME-2 и  $10 \times 10$  км у GOSAT) приводило к большой неопределенности в оценках величины GPP, особенно в регионах с неравномерным пространственным и видовым распределением растительности. Дальнейший прогресс в области мониторинга  $\text{CO}_2$  связан с запуском ESA в октябре 2017 г. спутника Sentinel-5 precursor (Sentinel-5P) со спектро-радиометром TROPOMI (tropospheric monitoring instrument) на борту [10]. Результаты TROPOMI впервые позволили создать глобальную базу данных SIF [11].

Отметим, что флуоресценция хлорофилла, индуцированная излучением Солнца, также является одним из продуктов алгоритмов обработки данных карбоновых обсерваторий OCO-2 и OCO-3.

## 2. Орбитальные карбоновые обсерватории

Спутник OCO-2 движется по солнечно-синхронной орбите с высотой 705 км и временем пересечения экватора около 13:30 по местному времени. Орбитальный цикл повторяется каждые 16 дней. Сенсоры спутника регистрируют уходящее из атмосферы Земли излучение в трех спектральных каналах с центрами на длинах волн 0.765, 1.61 и 2.06 мкм. Первый канал работает в полосе поглощения кислорода, два других — в полосах поглощения углекислого газа. Ширина области сканирования прибора составляет  $\sim 10$  км

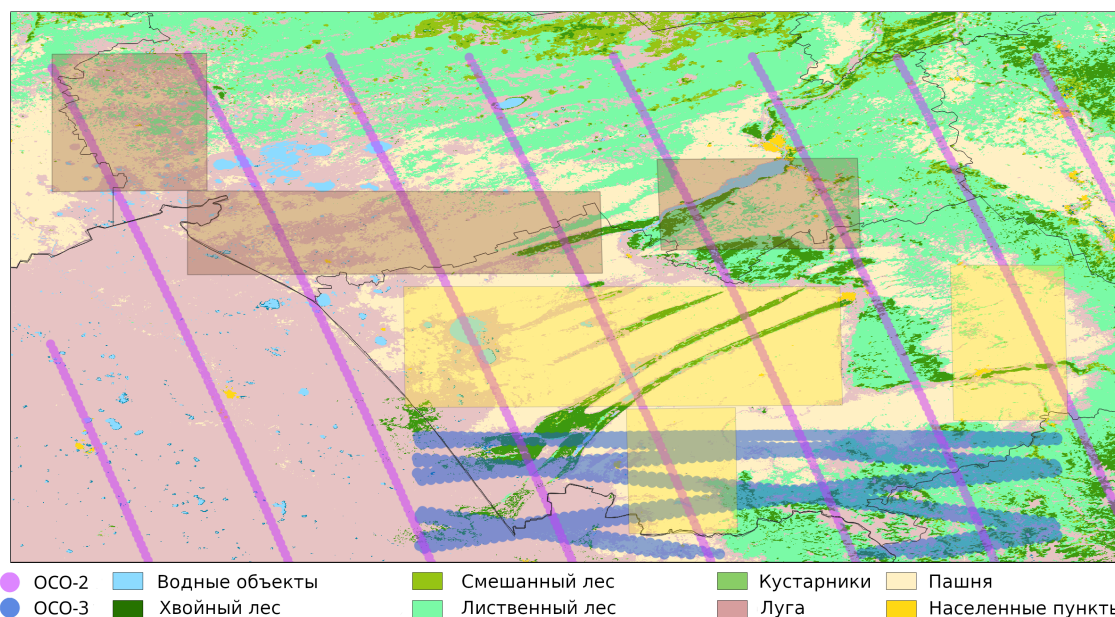


Рис. 1. 16-дневные траектории пролетов и пиксели полос сканирования обсерваторий OCO-2 (розовые) и OCO-3 (синие круги): желтые прямоугольные участки — зоны анализа для степных районов Алтайского края, коричневые — Новосибирской области. Фоновая карта — тип подстилающей поверхности по данным продукта MCD12Q1 прибора MODIS с пространственным разрешением 500 м

Fig. 1. The 16-days OCO-2 (purple) and OCO-3 (blue circles) overpasses: yellow rectangles — analysis zones for the steppe areas of Altai krai, brown — the one for Novosibirsk region. The background map is the land cover map based on the MODIS Land Cover Type product 11 (MCD12Q1) at a spatial resolution of 500 m

и содержит 8 пикселей размером  $1.29 \times 2.25$  км. Скорость съемки 24 измерения в секунду с высоким пространственным разрешением обеспечивает 10 %-ную долю безоблачных пикселей, пригодных для восстановления с высокой точностью содержания  $\text{CO}_2$  в атмосфере [4, 5].

Высокие точность и пространственное разрешение, а также характер орбитального движения спутника позволяют проводить исследования эмиссии, стоков и годового цикла содержания  $\text{CO}_2$  на региональном масштабе.

Верификация алгоритма восстановления  $\text{CO}_2$  по данным карбоновой обсерватории ОСО-2 проводилась с использованием результатов глобальной сети наземных станций TCCON (total carbon column observing network) [12].

Обсерватория ОСО-3 является продолжением программы NASA по изучению глобального карбонового цикла в атмосфере Земли [6]. Сенсор ОСО-3 практически не отличается от ОСО-2 и обладает такой же точностью восстановления содержания  $\text{CO}_2$ . Дополнительно в конструкцию аппарата добавлена оптическая система с двухосевым зеркалом, позволяющая, не прерывая основную съемку, наводить сенсор на отдельные объекты (например, города) размером до  $100 \times 100$  км и делать их мгновенные снимки с разрешением 100 м. Существенной особенностью ОСО-3, отличающей ее данные от ОСО-2, является ограничение области наблюдения от  $52^\circ$  ю. ш. до  $52^\circ$  с. ш., обусловленное конфигурацией орбиты МКС.

На рис. 1 показаны 16-дневные траектории пролетов и пиксели полос сканирования обсерваторий ОСО-2 и ОСО-3 над территориями Алтайского края и Новосибирской области. Прямоугольниками обозначены зоны анализа, охватывающие преимущественно степные районы, для которых проводилась обработка данных ОСО-2 и ОСО-3.

### 3. Модель содержания $\text{CO}_2$ в атмосфере

Содержание  $\text{CO}_2$  в атмосфере Земли имеет сезонный циклический характер. В работе [13] для интерпретации данных спутника GOSAT и верификации алгоритма восстановления  $\text{CO}_2$  использовалась эмпирическая модель, в рамках которой суточные значения содержания  $\text{CO}_2$  описываются нелинейной зависимостью

$$f(t) = a_0 + a_1 t + a_2 \sin(\omega[t - a_3] + \cos^{-1}[a_4 \cos(\omega[t - a_5])]) . \quad (1)$$

Здесь  $t$  — номер дня в году,  $\omega = 2\pi/365.25$ . Параметры модели  $a_0, \dots, a_5$  находятся в результате аппроксимации данных наблюдений с использованием нелинейного метода наименьших квадратов. Первые два слагаемых модели (1) определяют тренд изменения содержания  $\text{CO}_2$  в атмосфере. Амплитуда вариаций сезонных значений составляет  $2|a_2|$ . Отметим, что в работе [13] предложенная модель верифицирована по результатам измерений глобальной сети наземных станций TCCON [12].

### 4. Коррекция данных SIF

В стандартной схеме обработки данных ОСО-2 и ОСО-3 значения SIF получают на длинах волн 0.757 и 0.771 мкм. Однако в оценках GPP наиболее распространенным является значение SIF на длине волны 0.740 мкм, на которую приходится максимум спектра излучения хлорофилла. В работе выполнен пересчет с использованием соотношения  $\text{SIF}_{740} = 1.5(\text{SIF}_{757} + 2\text{SIF}_{771})/2$ , предложенного в [14].

Согласно [14], неопределенность значений SIF, обусловленная ошибками измерений и особенностями работы алгоритма обработки данных, равная  $\sigma$ , может приводить к возникновению отрицательных значений SIF. Для фильтрации таких событий использовались пороговые условия [14].

- Если  $(SIF + 2\sigma \geq 0)$ , то результаты достоверны.
- Если  $(SIF + 2\sigma < 0)$ , но  $(SIF + 3\sigma \geq 0)$ , то достоверность результатов под вопросом.
- Если  $(SIF + 3\sigma < 0)$ , то результаты не достоверны.

В работе использовались результаты алгоритма восстановления SIF версии 10, удовлетворяющие первому условию и имеющие флаг качества “отлично” и “хорошо”.

Результаты коррекции суточных значений SIF, полученных в алгоритмах обработки данных орбитальных карбоновых обсерваторий ОСО-2 и ОСО-3 и загруженных из хранилища NASA ESDS (Earth science data systems) [15, 16], использовались для получения количественных оценок GPP для степных зон Алтайского края и Новосибирской области. Для оценок GPP использовалось эмпирическое соотношение  $k \cdot SIF$  [8]. Значение коэффициента  $k = 13.5 \text{ гС} \cdot \text{м}^{-2} \cdot \text{день}^{-1} / (\text{Вт} \cdot \text{м}^{-2} \cdot \text{мкм}^{-1} \cdot \text{ср}^{-1})$  установлено в [8] из анализа данных TROPOMI и верификации этих данных по результатам наземных наблюдений.

## 5. Результаты и выводы

На рис. 2 показано поведение полного содержания  $\text{CO}_2$  в атмосфере степных зон Алтайского края и Новосибирской области, полученное по данным орбитальных карбоновых обсерваторий ОСО-2 и ОСО-3. Анализ данных ОСО-2 проводился для периода 2014–2021 гг., результаты ОСО-3 добавлены в обработку с 2019 г. Использовались результаты алгоритма восстановления содержания  $\text{CO}_2$  версии 10, прошедшие дополнительную корректировку по показаниям сети TCCON и имеющие флаг качества “хорошо”. Линией на рис. 2 показан результат аппроксимации суточных данных ОСО-2 и ОСО-3 модельной функцией (1).

Установлено, что для исследуемого периода скорость роста  $\text{CO}_2$  в атмосфере степных районов Алтайского края составляет  $\sim 2.36 \pm 0.6 \text{ млн}^{-1}/\text{год}$ , амплитуда сезонных колебаний  $\sim 5.0 \text{ млн}^{-1}$ . Для степных районов Новосибирской области скорость роста  $\text{CO}_2$  составляет  $\sim 2.52 \pm 0.09 \text{ млн}^{-1}/\text{год}$ , амплитуда сезонных колебаний  $\sim 4.8 \text{ млн}^{-1}$ .

На рис. 3 показаны годовой ход и межгодовая изменчивость GPP по региону. Видно, что средняя валовая первичная продукция за счет переработки атмосферного  $\text{CO}_2$  наземной растительностью в степных районах Алтайского края и Новосибирской области достигает максимума в летние месяцы и составляет  $\sim 10\text{--}12 \text{ гС}/(\text{м}^2 \cdot \text{день})$ .

## Заключение

С использованием данных специализированных орбитальных карбоновых обсерваторий ОСО-2 и ОСО-3 по содержанию  $\text{CO}_2$  и продукта “флуоресценция хлорофилла, индуцированная солнечным светом” выполнено исследование поведения полного содержания углекислого газа в атмосфере степных зон Алтайского края и Новосибирской области. Впервые получены количественные оценки валовой первичной продукции в этих регионах. Анализ данных ОСО-2 проводился для периода 2014–2021 гг., результаты ОСО-3 добавлены в обработку с 2019 г.

Установленный характер изменения полного содержания  $\text{CO}_2$  в атмосфере степных районов Алтайского края порядка  $2.36 \pm 0.6 \text{ млн}^{-1}/\text{год}$  соответствует среднему глобаль-

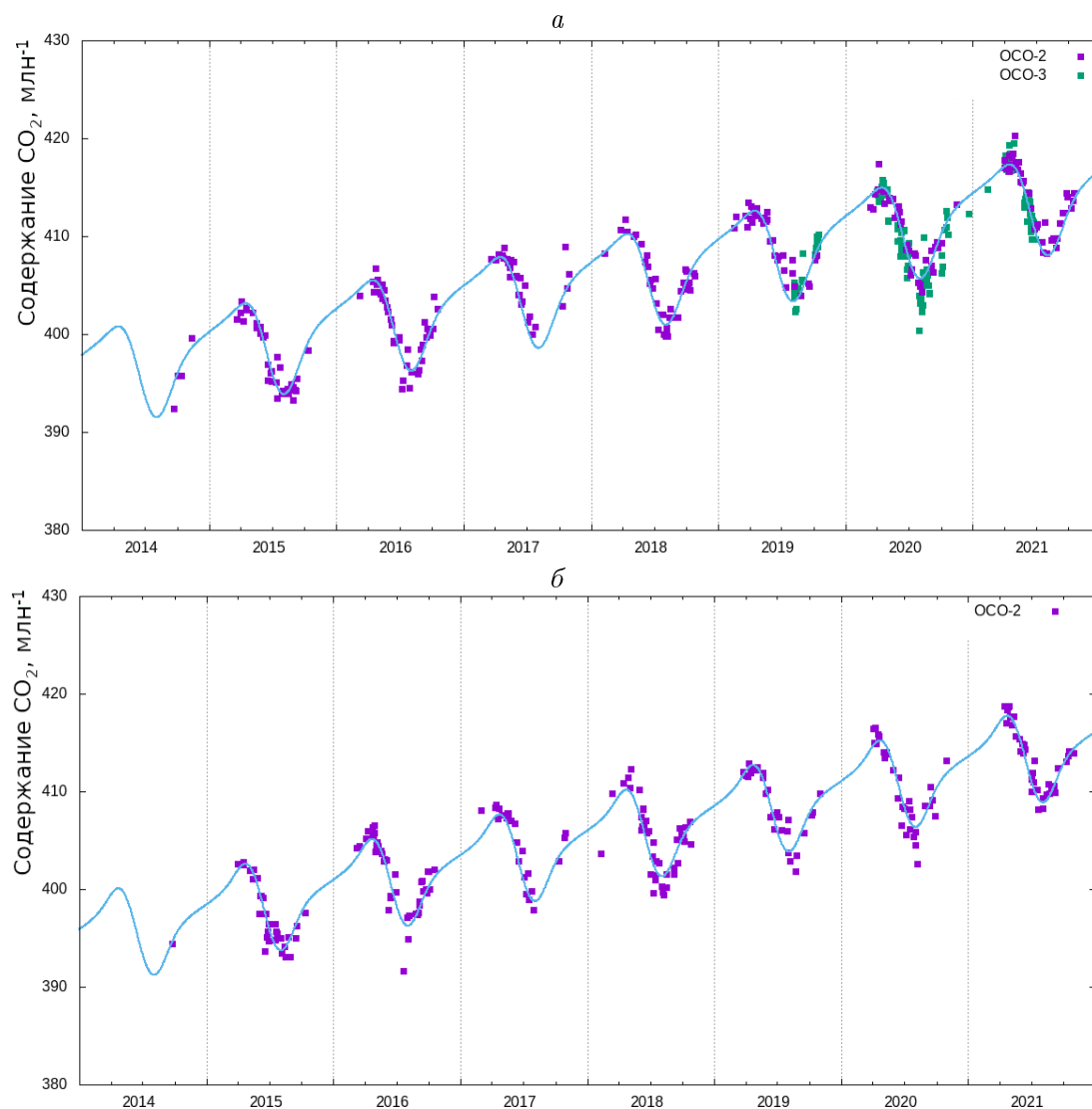


Рис. 2. Годовой ход и межгодовая изменчивость содержания  $\text{CO}_2$  в 2014–2021 гг. по данным орбитальных карбоновых обсерваторий OCO-2 и OCO-3 (точки на графике) в зонах анализа на территории Алтайского края (а) и Новосибирской области (б). Положение и границы зон анализа показаны на рис. 1. Линия — результат аппроксимации данных модельной функцией (1)

Fig. 2. Annual cycle and interannual variability of the  $\text{CO}_2$  content according to the orbital carbon observatories OCO-2 and OCO-3 (dots on the graph) in 2014–2021 in the analysis zones on the territory of Altai krai (a) and Novosibirsk region (b). The position and boundaries of the analysis zones are shown in the Fig. 1. The blue line is the result of data approximation by the model function (1)

ному темпу роста за последнее десятилетие  $2.40 \text{ млн}^{-1}/\text{год}$ , полученному в [1], в то время как оценка  $2.52 \pm 0.09 \text{ млн}^{-1}/\text{год}$  в степных районах Новосибирской области на 5% выше.

Годовой ход и межгодовая изменчивость валовой первичной продукции в 2014–2021 гг. в степных районах Алтайского края и Новосибирской области практически совпадают. GPP для обоих регионов достигает максимума в летние месяцы и составляет порядка  $10\text{--}12 \text{ гС}/(\text{м}^2 \cdot \text{день})$ .

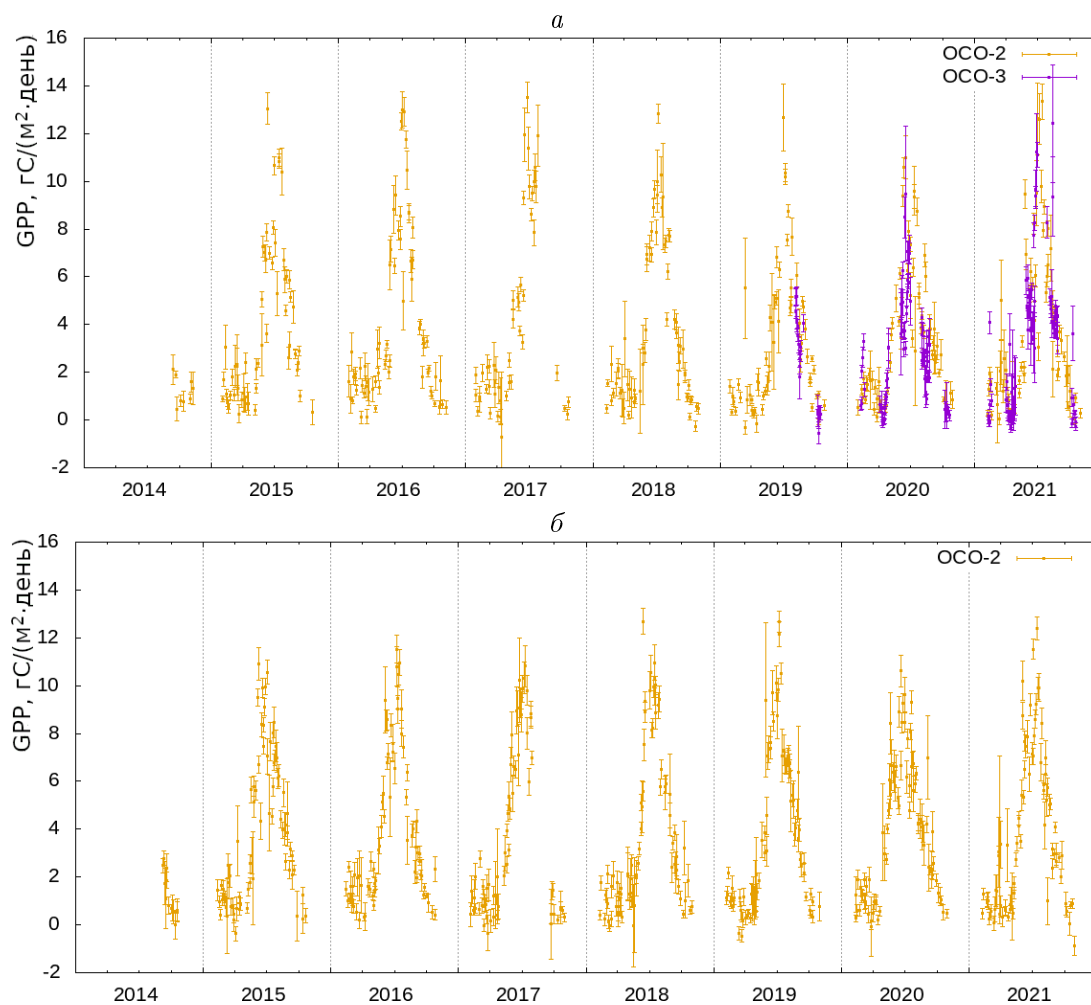


Рис. 3. Годовой ход и межгодовая изменчивость GPP в 2014–2021 гг. по данным орбитальных карбоновых обсерваторий OCO-2 и OCO-3 в зонах анализа на территории Алтайского края (а) и Новосибирской области (б). Положение и границы зон анализа показаны на рис. 1

Fig. 3. The annual cycle and interannual variability of the region average GPP in 2014–2021 according to OCO-2 and OCO-3 in the analysis zones on the territory of Altai krai (a) and Novosibirsk region (b). The position and boundaries of the analysis zones are shown in the Fig. 1. The error bars stand for the standard error of the mean GPP

Анализ данных показал, что в 2020 г. величина GPP для обоих регионов заметно меньше, чем в остальные годы. Вместе с тем в 2020 г. заметного изменения динамики потоков CO<sub>2</sub> в зонах анализа не установлено. Такой характер поведения следует принимать во внимание при анализе GPP на этапе проверки эффективности применяемых технологий землепользования на карбоновых полигонах Западной Сибири и, в частности, на карбоновом полигоне Алтайского края, созданном по инициативе экспертной комиссии при Министерстве науки и высшего образования РФ.

**Благодарности.** Работа выполнена при частичной финансовой поддержке Министерства науки и высшего образования РФ (проект в рамках государственного задания “Эмиссия парниковых газов источниками Западной Сибири и Алтая в первой половине XXI века: новые данные и оценки влияния на климат, природную среду и инфраструктурные проекты”), ФИЦ ИВТ (проект “Методы и технологии обработки временных серий спутниковых данных для оценки региональных источников парниковых газов”).

## Список литературы

- [1] Basso L., Crotwell A., Dolman H., Gatti L., Gerbig C., Griffith D., Hall B., Jordan A., Krummel P., Leuenberger M., Loh Z., Mikaloff-Fletcher S., Sawa Y., Schibig M., Tarasova O., Turnbull J., Vermeulen A. WMO greenhouse gas bulletin. WMO; 2021; (17):10.
- [2] Friedlingstein P., Jones M.W., O'Sullivan M., Andrew R.M., Bakker D.C.E., Hauck J., Le Quéré C., Peters G.P., Peters W., Pongratz J., Sitch S., Canadell J.G., Ciais P., Jackson R.B., Alin S.R., Anthoni P., Bates N.R., Becker M., Bellouin N., Bopp L., Chau T.T.T., Chevallier F., Chini L.P., Cronin M., Currie K.I., Decharme B., Djeutchouang L.M., Dou X., Evans W., Feely R.A., Feng L., Gasser T., Gilfillan D., Gkritzalis T., Grassi G., Gregor L., Gruber N., Gürses Ö., Harris I., Houghton R.A., Hurtt G.C., Iida Y., Ilyina T., Luijkx I.T., Jain A., Jones S.D., Kato E., Kennedy D., Klein Goldewijk K., Knauer J., Korsbakken J.I., Körtzinger A., Landschützer P., Lauvset S.K., Lefèvre N., Lienert S., Liu J., Marland G., McGuire P.C., Melton J.R., Munro D.R., Nabel J.E.M.S., Nakaoka S.-I., Niwa Y., Ono T., Pierrot D., Poulter B., Rehder G., Resplandy L., Robertson E., Rödenbeck C., Rosan T.M., Schwinger J., Schwingshackl C., Séférian R., Sutton A.J., Sweeney C., Tanhua T., Tans P.P., Tian H., Tilbrook B., Tubiello F., van der Werf G.R., Vuichard N., Wada C., Wanninkhof R., Watson A.J., Willis D., Wiltshire A.J., Yuan W., Yue C., Yue X., Zaehle S., Zeng J. Global carbon budget 2021. *Earth System Science Data*. 2022; (14):1917–2005. DOI:10.5194/essd-14-1917-2022. Available at: <https://essd.copernicus.org/articles/14/1917/2022>.
- [3] Feng L., Palmer P.I., Bösch H., Parker R.J., Webb A.J., Correia C.S.C., Deutscher N.M., Domingues L.G., Feist D.G., Gatti L.V., Gloor E., Hase F., Kivi R., Liu Y., Miller J.B., Morino I., Sussmann R., Strong K., Uchino O., Wang J., Zahn A. Consistent regional fluxes of CH<sub>4</sub> and CO<sub>2</sub> inferred from GOSAT proxy XCH<sub>4</sub>: XCO<sub>2</sub> retrievals, 2010–2014. *Atmospheric Chemistry and Physics*. 2017; (17):4781–4797. DOI:10.1098/rsta.2010.0240. Available at: <https://acp.copernicus.org/articles/17/4781/2017>.
- [4] Frankenberg C., Pollock R., Lee R.A.M., Rosenberg R., Blavier J.-F., Crisp D., O'Dell C.W., Osterman G.B., Roehl C., Wennberg P.O., Wunch D. The orbiting carbon observatory (OCO-2): spectrometer performance evaluation using pre-launch direct sun measurements. *Atmospheric Measurement Techniques*. 2015; (8):301–313. DOI:10.5194/amt-8-301-2015. Available at: <https://amt.copernicus.org/articles/8/301/2015>.
- [5] Reuter M., Buchwitz M., Schneising O., Krautwurst S., O'Dell C.W., Richter A., Bovensmann H., Burrows J.P. Towards monitoring localized CO<sub>2</sub> emissions from space: colocated regional CO<sub>2</sub> and NO<sub>2</sub> enhancements observed by the OCO-2 and S5P satellites. *Atmospheric Chemistry and Physics*. 2019; (19):9371–9383. DOI:10.5194/acp-19-9371-2019. Available at: <https://acp.copernicus.org/articles/19/9371/2019>.
- [6] Eldering A., Taylor T.E., O'Dell C.W., Pavlick R. The OCO-3 mission: measurement objectives and expected performance based on 1 year of simulated data. *Atmospheric Measurement Techniques*. 2019; (12):2341–2370. DOI:10.5194/amt-12-2341-2019. Available at: <https://amt.copernicus.org/articles/12/2341/2019>.
- [7] Li X., Xiao J., He B. Chlorophyll fluorescence observed by OCO-2 is strongly related to gross primary productivity estimated from flux towers in temperate forests. *Remote Sensing of*



- Environment. 2018; (204):659–671. DOI:10.1016/j.rse.2017.09.034. Available at: <https://www.sciencedirect.com/science/article/abs/pii/S0034425717304467>.
- [8] **Li X., Xiao J.** TROPOMI observations allow for robust exploration of the relationship between solar-induced chlorophyll fluorescence and terrestrial gross primary production. *Remote Sensing of Environment*. 2022; (268):112748. DOI:10.1016/j.rse.2021.112748. Available at: <https://www.sciencedirect.com/science/article/abs/pii/S0034425721004685>.
- [9] **Joiner J., Guanter L., Lindstrot R., Voigt M., Vasilkov A.P., Middleton E.M., Huemmrich K.F., Yoshida Y., Frankenberg C.** Global monitoring of terrestrial chlorophyll fluorescence from moderate spectral resolution near-infrared satellite measurements: methodology, simulations, and application to GOME-2. *Atmospheric Measurement Techniques*. 2013; (6):2803–2823. DOI:10.5194/amt-6-2803-2013. Available at: <https://amt.copernicus.org/articles/6/2803/2013>.
- [10] **Veefkind J.P., Aben I., McMullan K., Förster H., de Vries J., Otter G., Claas J., Eskes H.J., de Haan J.F., Kleipool Q., van Weele M., Hasekamp O., Hoogeveen R., Landgraf J., Snel R., Tol P., Ingmann P., Voors R., Kruizinga B., Vink R., Visser H., Levelt P.F.** TROPOMI on the ESA Sentinel-5 precursor: a GMES mission for global observations of the atmospheric composition for climate, air quality and ozone layer applications. *Remote Sensing of Environment*. 2012; (120):70–83. DOI:10.1016/j.rse.2011.09.027. Available at: <https://www.sciencedirect.com/science/article/abs/pii/S0034425712000661>.
- [11] **Guanter L., Bacour C., Schneider A., Aben I., van Kempen T.A., Maignan F., Retscher C., Köhler P., Frankenberg C., Joiner J., Zhang Y.** The TROPOSIF global sun-induced fluorescence dataset from the Sentinel-5P TROPOMI mission. *Earth System Science Data*. 2021; (13):5423–5440. DOI:10.5194/essd-13-5423-2021. Available at: <https://essd.copernicus.org/articles/13/5423/2021>.
- [12] **Wunch D., Toon G.C., Blavier J.-F.L., Washenfelder R.A., Notholt J., Connor B.J., Griffith D.W.T., Sherlock V., Wennberg P.O.** The total carbon column observing network. *Philosophical Transactions of the Royal Society A*. 2011; (369):2087–2112. DOI:10.1098/rsta.2010.0240. Available at: <https://www.jstor.org/stable/23035797>.
- [13] **Jacobs N., Simpson W.R., Graham K.A., Holmes C., Hase F., Blumenstock T., Tu Q., Frey M., Dubey M.K., Parker H.A., Wunch D., Kivi R., Heikkinen P., Notholt J., Petri C., Warneke T.** Spatial distributions of XCO<sub>2</sub> seasonal cycle amplitude and phase over northern high-latitude regions. *Atmospheric Chemistry and Physics*. 2021; (21):16661–16687. DOI:10.5194/acp-21-16661-2021. Available at: <https://acp.copernicus.org/articles/21/16661/2021>.
- [14] **Frankenberg C., Kurosu T., Osterman G.** Solar induced chlorophyll fluorescence data user's guide. Lite file version 10 and VEarly. JPL, CIT, Pasadena, California; 2020: 23.
- [15] **OCO-2 science team/Gunson M., Eldering A.** OCO-2 level 2 bias-corrected XCO<sub>2</sub> and other select fields from the full-physics retrieval aggregated as daily files, retrospective processing V10r, Greenbelt, MD, USA. Goddard Earth Sciences Data and Information Services Center (GES DISC); 2020. DOI:10.5067/E4E140XDMPO2. Available at: [https://disc.gsfc.nasa.gov/datasets/OC02\\_L2\\_Lite\\_FP\\_10r/summary](https://disc.gsfc.nasa.gov/datasets/OC02_L2_Lite_FP_10r/summary).
- [16] **OCO-2/OCO-3 science team/Chatterjee A., Payne V.** OCO-3 level 2 bias-corrected XCO<sub>2</sub> and other select fields from the full-physics retrieval aggregated as daily files, retrospective processing v10.4r, Greenbelt, MD, USA. Goddard Earth Sciences Data and Information Services Center (GES DISC); 2022. DOI:10.5067/8QR1N7IV81RD. Available at: [https://disc.gsfc.nasa.gov/datasets/OC03\\_L2\\_Lite\\_FP\\_10.4r/summary](https://disc.gsfc.nasa.gov/datasets/OC03_L2_Lite_FP_10.4r/summary).
-

**Technology for estimating gross primary production based on satellite observation data**YU. I. SHOKIN<sup>1</sup>, A. A. LAGUTIN<sup>1,2,\*</sup>, E. YU. MORDVIN<sup>1,2</sup>, N. V. VOLKOV<sup>1,2</sup><sup>1</sup>Federal Research Center for Information and Computational Technologies, 630090, Novosibirsk, Russia<sup>2</sup>Altai State University, 656049, Barnaul, Russia

\*Corresponding author: Lagutin Anatoly A., e-mail: lagutin@theory.asu.ru

Received November 10, 2022, revised December 05, 2022, accepted December 12, 2022.

**Abstract**

*The purpose* of this work is to establish the behaviour of the total carbon dioxide content in an atmosphere of the steppe zones of Altai krai and Novosibirsk region in 2014–2021, as well as to obtain quantitative estimates of the gross primary production using the product “Solar induced chlorophyll fluorescence” (SIF) of the orbital carbon observatories OCO-2 and OCO-3.

*Methods.* To achieve this goal, we processed the CO<sub>2</sub> and SIF product content data at the orbital carbon observatories OCO-2 and OCO-3. The analysis of OCO-2 data was carried out for the period 2014–2021, the results of OCO-3 were added to processing in 2019. To describe the seasonal cycle of CO<sub>2</sub> content in the atmosphere, we used an empirical model proposed for the interpretation of the GOSAT satellite data and verified by the results of measurements of the global network TCCON.

*Results.* It has been established that for the period under study, the growth rate of CO<sub>2</sub> in the atmosphere of the steppe regions of Altai krai is  $\sim 2.36 \pm 0.6$  ppm/year, the amplitude of seasonal fluctuations is  $\sim 5.0$  ppm. For the steppe zones of Novosibirsk region, the growth rate of CO<sub>2</sub> is  $\sim 2.52 \pm 0.09$  ppm/year, the amplitude of seasonal fluctuations is  $\sim 4.8$  ppm. It is shown that the average gross primary production due to the processing of atmospheric CO<sub>2</sub> by terrestrial vegetation in the steppe ones of Altai krai and Novosibirsk region reaches a maximum in the summer months and is equal to  $\sim 10$ – $12$  gC/(m<sup>2</sup>·day).

*Conclusions.* Using the CO<sub>2</sub> and SIF product content data at the OCO-2 and OCO-3 orbital carbon observatories, we carried out the study of the behavior of the total carbon dioxide content in the atmosphere of the steppe zones of Altai krai and Novosibirsk region. The quantitative estimates of gross primary production in these regions have been obtained for the first time.

*Keywords:* Altai krai, Novosibirsk region, atmosphere, carbon dioxide, gross primary production, orbital carbon observatories.

*Citation:* Shokin Yu.I., Lagutin A.A., Mordvin E.Yu., Volkov N.V. Technology for estimating gross primary production based on satellite observation data. Computational Technologies. 2023; 28(2):103–114. DOI:10.25743/ICT.2023.28.2.009. (In Russ.)

**Acknowledgements.** The work was supported in part by the Ministry of science and higher education of the Russian Federation (project within the framework of the government assignment “Greenhouse gas emissions from sources of Western Siberia and Altai in the first half of the 21st century: new data and assessments of the impact on climate, the environment and infrastructure projects”), FRC ICT (project “Methods and technologies for processing time series of satellite data to assess regional sources of greenhouse gases”).

## References

1. Basso L., Crotwell A., Dolman H., Gatti L., Gerbig C., Griffith D., Hall B., Jordan A., Krummel P., Leuenberger M., Loh Z., Mikaloff-Fletcher S., Sawa Y., Schibig M., Tarasova O., Turnbull J., Vermeulen A. WMO greenhouse gas bulletin. WMO; 2021; (17):10.
2. Friedlingstein P., Jones M.W., O'Sullivan M., Andrew R.M., Bakker D.C.E., Hauck J., Le Quéré C., Peters G.P., Peters W., Pongratz J., Sitch S., Canadell J.G., Ciais P., Jackson R.B., Alin S.R., Anthoni P., Bates N.R., Becker M., Bellouin N., Bopp L., Chau T.T.T., Chevallier F., Chini L.P., Cronin M., Currie K.I., Decharme B., Djeutchouang L.M., Dou X., Evans W., Feely R.A., Feng L., Gasser T., Gilfillan D., Gkritzalis T., Grassi G., Gregor L., Gruber N., Gürses Ö., Harris I., Houghton R.A., Hurtt G.C., Iida Y., Ilyina T., Luijckx I.T., Jain A., Jones S.D., Kato E., Kennedy D., Klein Goldewijk K., Knauer J., Korsbakken J.I., Körtzinger A., Landschützer P., Lauvset S.K., Lefèvre N., Lienert S., Liu J., Marland G., McGuire P.C., Melton J.R., Munro D.R., Nabel J.E.M.S., Nakaoka S.-I., Niwa Y., Ono T., Pierrot D., Poulter B., Rehder G., Resplandy L., Robertson E., Rödenbeck C., Rosan T.M., Schwinger J., Schwingshackl C., Séférian R., Sutton A.J., Sweeney C., Tanhua T., Tans P.P., Tian H., Tilbrook B., Tubiello F., van der Werf G.R., Vuichard N., Wada C., Wanninkhof R., Watson A.J., Willis D., Wiltshire A.J., Yuan W., Yue C., Yue X., Zaehle S., Zeng J. Global carbon budget 2021. *Earth System Science Data*. 2022; (14):1917–2005. DOI:10.5194/essd-14-1917-2022. Available at: <https://essd.copernicus.org/articles/14/1917/2022>.
3. Feng L., Palmer P.I., Bösch H., Parker R.J., Webb A.J., Correia C.S.C., Deutscher N.M., Domingues L.G., Feist D.G., Gatti L.V., Gloor E., Hase F., Kivi R., Liu Y., Miller J.B., Morino I., Sussmann R., Strong K., Uchino O., Wang J., Zahn A. Consistent regional fluxes of CH<sub>4</sub> and CO<sub>2</sub> inferred from GOSAT proxy XCH<sub>4</sub>: XCO<sub>2</sub> retrievals, 2010–2014. *Atmospheric Chemistry and Physics*. 2017; (17):4781–4797. DOI:10.1098/rsta.2010.0240. Available at: <https://acp.copernicus.org/articles/17/4781/2017>.
4. Frankenberg C., Pollock R., Lee R.A.M., Rosenberg R., Blavier J.-F., Crisp D., O'Dell C.W., Osterman G.B., Roehl C., Wennberg P.O., Wunch D. The orbiting carbon observatory (OCO-2): spectrometer performance evaluation using pre-launch direct sun measurements. *Atmospheric Measurement Techniques*. 2015; (8):301–313. DOI:10.5194/amt-8-301-2015. Available at: <https://amt.copernicus.org/articles/8/301/2015>.
5. Reuter M., Buchwitz M., Schneising O., Krautwurst S., O'Dell C.W., Richter A., Bovensmann H., Burrows J.P. Towards monitoring localized CO<sub>2</sub> emissions from space: colocated regional CO<sub>2</sub> and NO<sub>2</sub> enhancements observed by the OCO-2 and S5P satellites. *Atmospheric Chemistry and Physics*. 2019; (19):9371–9383. DOI:10.5194/acp-19-9371-2019. Available at: <https://acp.copernicus.org/articles/19/9371/2019>.
6. Eldering A., Taylor T.E., O'Dell C.W., Pavlick R. The OCO-3 mission: measurement objectives and expected performance based on 1 year of simulated data. *Atmospheric Measurement Techniques*. 2019; (12):2341–2370. DOI:10.5194/amt-12-2341-2019. Available at: <https://amt.copernicus.org/articles/12/2341/2019>.
7. Li X., Xiao J., He B. Chlorophyll fluorescence observed by OCO-2 is strongly related to gross primary productivity estimated from flux towers in temperate forests. *Remote Sensing of Environment*. 2018; (204):659–671. DOI:10.1016/j.rse.2017.09.034. Available at: <https://www.sciencedirect.com/science/article/abs/pii/S0034425717304467>.
8. Li X., Xiao J. TROPOMI observations allow for robust exploration of the relationship between solar-induced chlorophyll fluorescence and terrestrial gross primary production. *Remote Sensing of Environment*. 2022; (268):112748. DOI:10.1016/j.rse.2021.112748. Available at: <https://www.sciencedirect.com/science/article/abs/pii/S0034425721004685>.
9. Joiner J., Guanter L., Lindstrot R., Voigt M., Vasilkov A.P., Middleton E.M., Huemmrich K.F., Yoshida Y., Frankenberg C. Global monitoring of terrestrial chlorophyll fluorescence from moderate spectral resolution near-infrared satellite measurements: methodology, simulations, and application to GOME-2. *Atmospheric Measurement Techniques*. 2013; (6):2803–2823. DOI:10.5194/amt-6-2803-2013. Available at: <https://amt.copernicus.org/articles/6/2803/2013>.
10. Veeffkind J.P., Aben I., McMullan K., Förster H., de Vries J., Otter G., Claas J., Eskes H.J., de Haan J.F., Kleipool Q., van Weele M., Hasekamp O., Hoogeveen R., Landgraf J., Snel R., Tol P., Ingmann P., Voors R., Kruizinga B., Vink R., Visser H.,

- Levelt P.F.** TROPOMI on the ESA Sentinel-5 precursor: a GMES mission for global observations of the atmospheric composition for climate, air quality and ozone layer applications. *Remote Sensing of Environment*. 2012; (120):70–83. DOI:10.1016/j.rse.2011.09.027. Available at: <https://www.sciencedirect.com/science/article/abs/pii/S0034425712000661>.
11. **Guanter L., Bacour C., Schneider A., Aben I., van Kempen T.A., Maignan F., Retscher C., Köhler P., Frankenberg C., Joiner J., Zhang Y.** The TROPOSIF global sun-induced fluorescence dataset from the Sentinel-5P TROPOMI mission. *Earth System Science Data*. 2021; (13):5423–5440. DOI:10.5194/essd-13-5423-2021. Available at: <https://essd.copernicus.org/articles/13/5423/2021>.
  12. **Wunch D., Toon G.C., Blavier J.-F.L., Washenfelder R.A., Notholt J., Connor B.J., Griffith D.W.T., Sherlock V., Wennberg P.O.** The total carbon column observing network. *Philosophical Transactions of the Royal Society A*. 2011; (369):2087–2112. DOI:10.1098/rsta.2010.0240. Available at: <https://www.jstor.org/stable/23035797>.
  13. **Jacobs N., Simpson W.R., Graham K.A., Holmes C., Hase F., Blumenstock T., Tu Q., Frey M., Dubey M.K., Parker H.A., Wunch D., Kivi R., Heikkinen P., Notholt J., Petri C., Warneke T.** Spatial distributions of XCO<sub>2</sub> seasonal cycle amplitude and phase over northern high-latitude regions. *Atmospheric Chemistry and Physics*. 2021; (21):16661–16687. DOI:10.5194/acp-21-16661-2021. Available at: <https://acp.copernicus.org/articles/21/16661/2021>.
  14. **Frankenberg C., Kurosu T., Osterman G.** Solar induced chlorophyll fluorescence data user's guide. Lite file version 10 and VEarly. JPL, CIT, Pasadena, California; 2020: 23.
  15. **OCO-2 science team/Gunson M., Eldering A.** OCO-2 level 2 bias-corrected XCO<sub>2</sub> and other select fields from the full-physics retrieval aggregated as daily files, retrospective processing V10r, Greenbelt, MD, USA. Goddard Earth Sciences Data and Information Services Center (GES DISC); 2020. DOI:10.5067/E4E140XDMP02. Available at: [https://disc.gsfc.nasa.gov/datasets/OC02\\_L2\\_Lite\\_FP\\_10r/summary](https://disc.gsfc.nasa.gov/datasets/OC02_L2_Lite_FP_10r/summary).
  16. **OCO-2/OCO-3 science team/Chatterjee A., Payne V.** OCO-3 level 2 bias-corrected XCO<sub>2</sub> and other select fields from the full-physics retrieval aggregated as daily files, retrospective processing v10.4r, Greenbelt, MD, USA. Goddard Earth Sciences Data and Information Services Center (GES DISC); 2022. DOI:10.5067/8QR1N7IV81RD. Available at: [https://disc.gsfc.nasa.gov/datasets/OC03\\_L2\\_Lite\\_FP\\_10.4r/summary](https://disc.gsfc.nasa.gov/datasets/OC03_L2_Lite_FP_10.4r/summary).