УДК 528.88:581.13 10.56564/27825264_2026_1_20

ОЦЕНКА ВАЛОВОЙ ПЕРВИЧНОЙ ПРОДУКЦИИ GPP ДЛЯ ТЕРРИТОРИИ СВЕРДЛОВСКОЙ ОБЛАСТИ ПО ИЗМЕРЕНИЯМ СПУТНИКОВОЙ АППАРАТУРЫ OCO-2 И MODIS

А. П. Лужецкая, С. К. Джолумбетов, К. Л. Антонов, Е. С. Наговицына

Институт промышленной экологии УрО РАН, г. Екатеринбург, Россия

В настоящем исследовании оценена валовая первичная продукция (gross primary production) (GPP) Свердловской области за 2014–2024 гг. по данным солнечно-индуцированной флуоресценции хлорофилла спутниковой миссии OCO-2 и по глобальному продукту FluxSat v2.2, основанному на данных MODIS. Установлен выраженный годовой цикл GPP с максимумом в июне – июле (~ 7,4– 7,5 гСм⁻²день⁻¹ по данным OCO-2 и ~ 8,5–8,6 гС·м⁻²·день⁻¹ по данным FluxSat) и минимумом в октябре – апреле (~ 0,8–1,3 гСм⁻²день⁻¹ по данным OCO-2 и ~ 0,1–1,5 гС·м⁻²·день⁻¹ по данным FluxSat). Статистический анализ не выявил значимого линейного тренда GPP за исследованный период. Пространственное распределение GPP отражает климатические градиенты области: более высокие летние значения на юге обусловлены более теплым климатом и преобладанием лиственно-хвойных лесов.

Ключевые слова: валовая первичная продукция; OCO-2; FluxSat/MODIS; Свердловская область; сезонная динамика.

1. Введение

За последние десятилетия наблюдается усиление глобальных климатических изменений, проявляющихся в росте частоты и интенсивности экстремальных погодных явлений – засух, наводнений и тепловых волн. Это обусловлено прежде всего антропогенным увеличением концентрации парниковых газов (ПГ) в атмосфере [1].

В ответ на глобальные вызовы климатических изменений международное сообщество в рамках Рамочной конвенции ООН об изменении климата разработало и приняло Парижское соглашение в 2015 г. (Paris Agreement. United Nations Framework Convention on Climate Change. https://unfccc.int/process-and-meetings/the-paris-agreement). Соглашение, ратифицированное 196 странами, установило долгосрочную цель удержания роста средней глобальной температуры значительно ниже 2 °C (с усилиями по ограничению до 1,5 °C) по сравнению с доиндустриальным уровнем к концу XXI в.

Реализация поставленной цели требует существенного сокращения антропогенных выбросов (ПГ) с последующим достижением углеродной нейтральности. Одна из ключевых задач в этом направлении – получение достоверных количественных оценок эмиссии ПГ в атмосферу и объемов их поглощения климатически активными системами [1, 2].

Среди антропогенных ПГ доминирующую роль в радиационном форсировании климата играет углекислый газ (CO_2). Обмен CO_2 между наземными экосистемами и атмосферой – один из основных процессов, влияющих на его концентрацию в атмосфере. Этот обмен в значительной степени определяется валовой первичной продукцией GPP наземной растительности, характеризующей количество поглощаемого растительностью CO_2 на единицу площади в результате фотосинтеза [3, 4]. Мониторинг пространственно-временных вариаций GPP и их трендов имеет решающее значение для анализа углеродного цикла в условиях меняющегося климата, позволяя прогнозировать углеродный баланс и секвестрационный потенциал экосистем.

В настоящее время существует ряд методов оценки GPP. К ним относятся наземные измерения методом вихревой ковариации (eddy covariance, EC) [5, 6];

параметрические модели, такие как модель светового использования энергии (Light Use Efficiency, LUE) [7]; процессно-ориентированные подходы [6]; а также спутниковые методы дистанционного зондирования, включая индекс отражательной способности растительности в ближнем инфракрасном диапазоне (Near-Infrared Reflectance of vegetation, NIRv), индекс площади листьев (Leaf Area Index, LAI) и измерения солнечно-индуцированной флуоресценции хлорофилла (Solar-Induced Fluorescence, SIF) [8, 9, 10].

Метод EC – точный метод для прямого измерения потоков CO_2 между экосистемой и атмосферой на площадках ~0,5–2 км², однако его возможности ограничены относительно небольшим числом измерительных площадок. Процессно-ориентированные модели используют биофизические параметры растений и набор метеохарактеристик, но они сложны в реализации, требуют большого объема входных данных и чувствительны к неопределенностям, что снижает их надежность при масштабировании результатов.

В настоящей работе оценивался показатель валовой первичной продукции (GPP) Свердловской области (56,10–57,24° с. ш., 61,93–66,19° в. д.) за период с 01.01.2014 по 31.12.2024 с использованием спутниковых данных SIF миссии OCO-2 и глобального набора оценок GPP FluxSat v2.2 на основе продуктов MODIS. Полученные оценки GPP могут быть использованы в качестве априорных оценок для валидации наземных EC-измерений, параметризации моделей (например, модели общей циркуляции атмосферы и океана (МОЦАО) [11,12]) и анализа продуктивности бореальных экосистем Урала в условиях климатических изменений.

2. Материалы и методы

Спутник OCO-2 движется по солнечно-синхронной орбите на высоте 705 км с периодом обращения 98,8 мин и временем пересечения экватора ~13:36 по местному времени; повторяемость траекторий сканирования на поверхности Земли – приблизительно каждые 16 дней. Область сканирования охватывает ~10 км и содержит 8 пикселей размером 1,29 x 2,25 км. Спектрометр регистрирует SIF на длинах волн 757 и 771 нм с пространственным разрешением 1,3 × 2,25 км. Для анализа GPP использовалось значение SIF на длине волны 740 нм (пик флуоресценции хлорофилла), вычисляемое по формуле [13]:

$$SIF_{740} = 0{,}75(SIF_{757} + 1{,}5 \cdot SIF_{771)}, \quad (1)$$

где SIF_{740}, SIF_{757}, SIF_{771} – индуцированное солнечным светом флуоресцентное излучение хлорофилла на соответствующих длинах волн.

Данные, рассчитанные по алгоритмам обработки OCO-2 [13], были получены из архива NASA Earth Science Data Systems (ESDS) [14] за период с 01.01.2014 по 31.12.2024. Отбирались значения, удовлетворяющие условию SIF + 2σ ≥ 0, где σ – стандартное отклонение многократных зондирований. Количество дней наблюдений варьировалось от 22 до 103 в год, количество измерений в сутках – от 1 до 2 458 в зависимости от облачности и длительности пролета спутника.

FluxSat [15,16] представляет собой глобальный набор оценок GPP, полученный из репозитория NASA ORNL DAAC. Данные основаны на продуктах MODIS (индекса отражательной способности растительности NIRv, индекса площади листьев LAI) и модели светового использования энергии (LUE), которые калибруются по ~200 наземным станциям FLUXNET (EC) с помощью машинного обучения. Нейросети обучаются на парах – GPP EC-станций + MODIS для экстраполяции на глобальную сетку. Пространственное разрешение – 0,05° (~5 км), временное – суточное.

Для анализа GPP отбирались значения без значительных облачных артефактов (quality flag ≥ 0). Количество валидных дней варьировалось от 252 до 324 в год,

количество измерений в сутках – от 1 до 11 894 в зависимости от облачности и фенологии.

Для расчета GPP по данным OCO-2 использовалась эмпирическая зависимость (2) [17]:

$$GPP = k \cdot SIF, \quad (2)$$

где GPP [гСм$^{-2}$ день$^{-1}$ (где гС – граммы углерода)] – валовая первичная продукция; k [гС м$^{-2}$ день$^{-}$1/Вт м$^{-2}$мкм$^{-1}$ср$^{-1}$ (где ср$^{-1}$ – стерадиан)] – коэффициент пропорциональности; SIF [Вт м$^{-2}$мкм$^{-1}$ср$^{-1}$] – солнечно-индуцированная флуоресценция хлорофилла.

Значение коэффициента k = 13,5 гСм$^{-2}$день$^{-1}$/(Вт м$^{-2}$мкм$^{-1}$ср$^{-1}$) установлено в [17] на основе анализа данных SIF, измеренных спектрорадиометром TROPOMI, с последующей верификацией по результатам наземных наблюдений методом EC.

Для FluxSat/MODIS использовались прямые оценки GPP, полученные из данных FluxSat, GPP= FluxSat.

Среднесуточные GPP с неопределенностями типа A (Ua) получены путем пространственно-временного усреднения исходных данных по территории Свердловской области. Неопределенности типа A рассчитывались по формуле (3), согласно [18,19], для оценки точности полученных значений GPP.

$$U_a = \sqrt{\frac{\sum_{i=1}^{n}(x_i - \bar{X})^2}{n(n-1)}}, \quad (3)$$

где U_a – неопределенность типа A, $\bar{x}$ – среднее арифметическое значение GPP, x_i – значение GPP в конкретный момент времени, n – количество значений GPP в конкретный момент времени, участвующих при усреднении.

Долговременные тенденции во временных рядах среднегодовых данных GPP определялись с помощью метода теста наклона Сена (оценщик Sen's slope, Theil-Sen estimator) [20]. Оценщик Sen's slope широко применяется в климатологии для анализа трендов экологических временных рядов [21–24]. С помощью этого метода вычисляются все попарные наклоны между наблюдаемыми значениями GPP и соответствующими временными точками (годами) с помощью уравнения (4):

$$m_{ij} = \frac{y_j - y_i}{x_j - x_i}, \quad (4)$$

где y_i и y_j значения данных во времени x_i и x_j. Медиана значений m_{ij} является оценкой наклона Сена.

Поскольку оценка наклона по методу Сена не позволяет проверить статистическую значимость выявленной тенденции, для оценки значимости трендов GPP был использован непараметрический критерий Манна – Кендалла [25, 26]. Тест основан на сравнении всех возможных пар последовательных наблюдений: для каждой пары определяется знак разности между значениями, где положительный (+1) указывает на возрастание тренда, а отрицательный (–1) – на его убывание. Сумма этих знаков образует статистику S, а нормализованный коэффициент τ принимает значения в диапазоне от –1 до +1 и отражает направление и относительную силу тренда. Статистическая значимость тренда оценивалась по стандартизованной Z-статистике, вычисленной на основе S и ее дисперсии, при уровне значимости $p < 0,05$.

3. Результаты и обсуждение

На рис. 1 представлен годовой ход и межгодовая изменчивость GPP по территории Свердловской области. Полученные данные отражают характерный сезонный паттерн для региона, охватывающего зоны тайги, смешанных лесов и лесостепи [27]. Для более наглядного представления сезонного паттерна GPP были оценены среднемесячные значения за весь рассмотренный период (рис. 2, табл.1). Пиковые значения GPP наблюдаются в июне – июле в период активной фазы вегетации, составляя ~ 7,4–7,5 гСм$^{-2}$день$^{-1}$ по данным OCO-2; и ~ 8,5–8,6 гС·м$^{-2}$·день$^{-1}$ по данным FluxSat. Минимальные значения регистрируются с октября по апрель, что согласуется с фенологическими циклами растительности и длиной вегетационного сезона. Наблюдаемый сезонный цикл GPP согласуется с результатами независимых исследований для схожих климатических условий [28, 29].

Тренды межгодовых изменений, рассчитанные в виде аппроксимированной скорости роста, представлены на рис. 1. Согласно данным MODIS (τ=0,236, p=0,359) и OCO-2 (τ=0,000, p=1,000), статистически значимых тенденций не выявлено (p > 0,05). Незначительное положительное направление для MODIS (0,04 гС·м$^{-2}$·год$^{-1}$, ~1,3 % год$^{-1}$) укладывается в диапазон естественной изменчивости, подтверждая стабильность GPP региона, что свидетельствует о стабильности продукционного процесса в регионе. Это согласуется с выводами, представленными в [24], о пространственной неоднородности трендов GPP. Анализ временных рядов за период 2003–2015 гг. показал как положительные региональные тренды GPP в Восточной Сибири, Китае, Индии и Северной Америке, так и отрицательные значения в Центральной Сибири и севернее Каспийского моря. Тренды изменялись в пределах от –0,15 до +0,15 гС·м$^{-2}$·год$^{-1}$.

Незначительное повышение GPP, выявленное по данным MODIS, может быть обусловлено как локальными климатическими флуктуациями (умеренное потепление и увеличение осадков в отдельные годы), так и особенностями алгоритма обработки спутниковых данных.

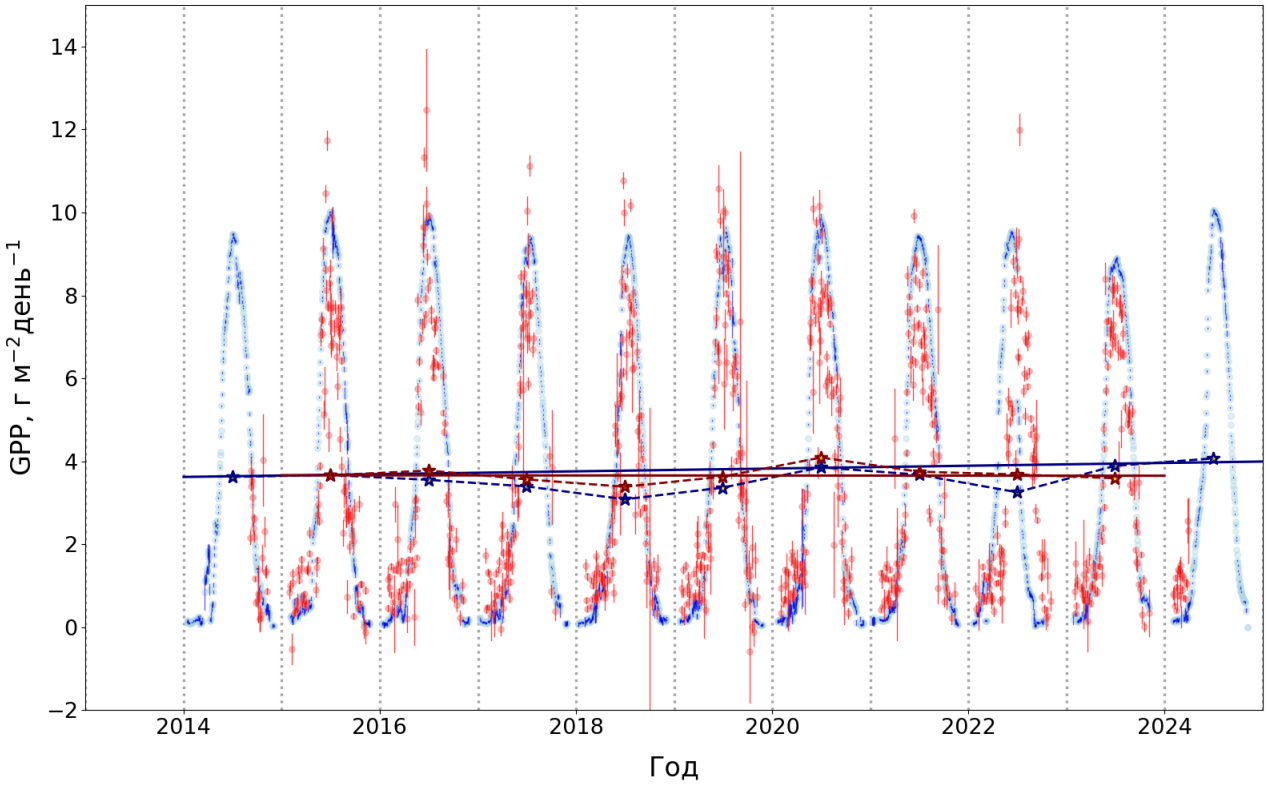

Рис. 1. Годовые вариации валовой первичной продукции (GPP) по данным орбитальной карбоновой обсерватории OCO-2 (красный цвет) и FluxSat/MODIS (синий цвет). Точки на рисунке обозначают среднесуточные значения, вертикальные линии – неопределенности типа А; звездочки – среднегодовые значения; пунктирная линия – интерполяция среднегодовых значений; сплошная линия – аппроксимирующая функция скорости роста GPP

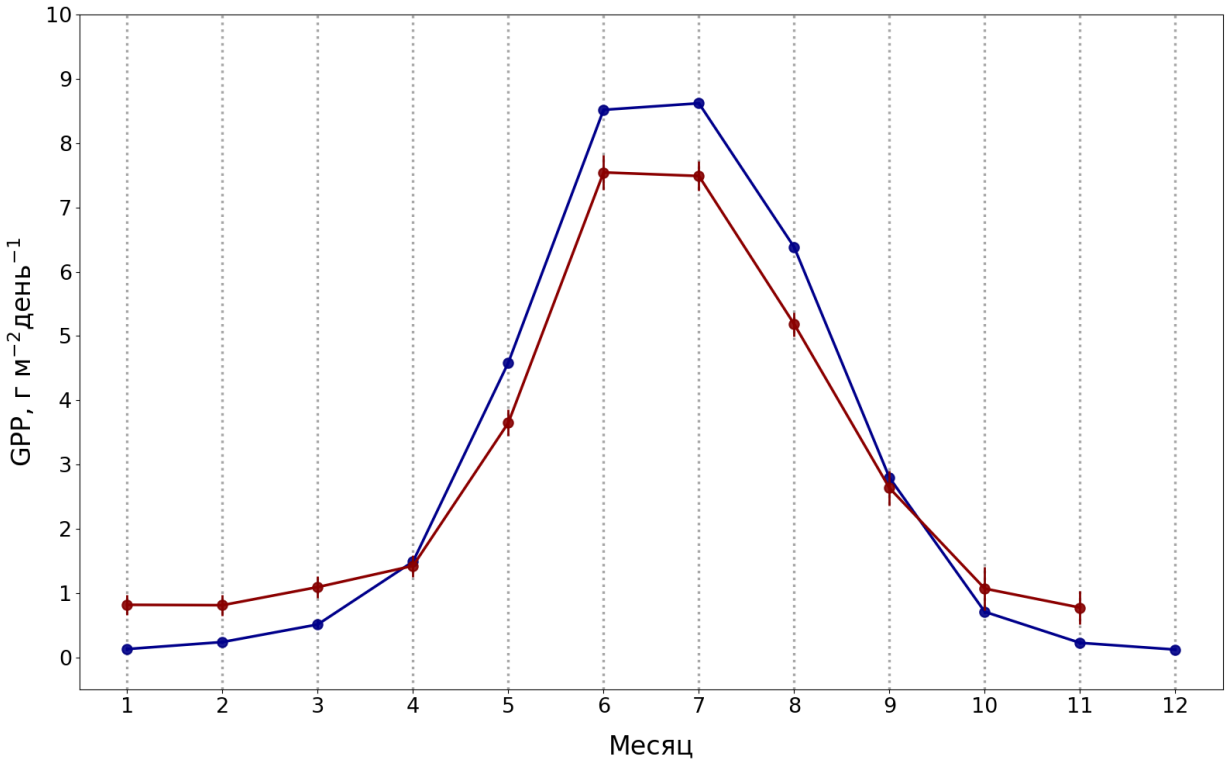

Рис. 2. Среднемесячные значения GPP с неопределенностями типа А (вертикальные линии) по данным орбитальной карбоновой обсерватории OCO-2 (красный цвет) и FluxSat/MODIS (синий цвет)

Таблица 1. Среднемесячные значений GPP (гСм$^{-2}$день$^{-1}$) с неопределенностями типа A (Ua), минимальные и максимальные значения GPP по данным OCO-2 и FluxSat для Свердловской области с 2014 по 2024 г. ($GPP_{mean} \pm Ua$, GPP_{min}, GPP_{max})

Месяц	OCO-2			FluxSat/MODIS		
	$GPP_{mean} \pm U_a$	GPP_{min}	GPP_{max}	$GPP_{mean} \pm Ua$	GPP_{min}	GPP_{max}
1	0,75 ± 0,046	0,60	0,95	0,13 ± 0,003	0,085	0,21
2	0,89 ± 0,009	0,57	1,16	0,24 ± 0,009	0,14	0,56
3	1,02 ± 0,009	0,91	1,20	0,51 ± 0,019	0,31	1,10
4	1,30 ± 0,010	1,10	1,54	1,49 ± 0,06	0,95	3,90
5	3,82 ± 0,015	1,65	6,13	4,57 ± 0,12	2,97	8,20
6	7,44 ± 0,015	6,37	8,12	8,52 ± 0,07	6,67	9,37
7	7,50 ± 0,013	6,92	8,32	8,63 ± 0,10	3,29	9,78
8	5,43 ± 0,013	4,95	5,93	6,38 ± 0,11	0,92	7,41
9	2,52 ± 0,012	0,89	3,06	2,78 ± 0,08	0,11	3,31
10	0,90 ± 0,016	0,68	1,69	0,76 ± 0,015	0,13	0,90
11	0,94 ± 0,038	0,35	1,40	0,21 ± 0,012	0,07	0,5
12	–	–	–	0,09 ± 0,016	0	0,2

Пространственное распределение GPP оценивалось по глобальному набору данных FluxSat, обладающих высоким пространственным разрешением и полным покрытием исследуемой территории. Анализ по данным OCO-2 не проводился ввиду ограниченной ширины полосы сканирования (~10 км), не обеспечивающей репрезентативного охвата области. На рис. 3 показано пространственное распределение GPP по календарным сезонам. Повышенные значения GPP наблюдаются в летний период на юге Свердловской области, что, вероятно, обусловлено более благоприятными условиями окружающей среды и интенсивными процессами вегетации в районах с преобладанием лиственно-хвойных и мелколиственных лесов. На севере области летний максимум ниже из-за короткого сезона активной вегетации и доминирования таежных хвойных массивов с меньшей продуктивностью в условиях сурового климата. В зимний период GPP на всей территории области, ожидаемо, имеет значения близкие к нулю из-за прекращения фотосинтеза для большинства растений. В переходные сезоны (весна, осень) закономерности пространственного распределения GPP неоднозначны. Отдельные участки с незначительно повышенными значениями связаны, скорее всего, с локальными особенностями внешних условий или с погрешностью моделирования.

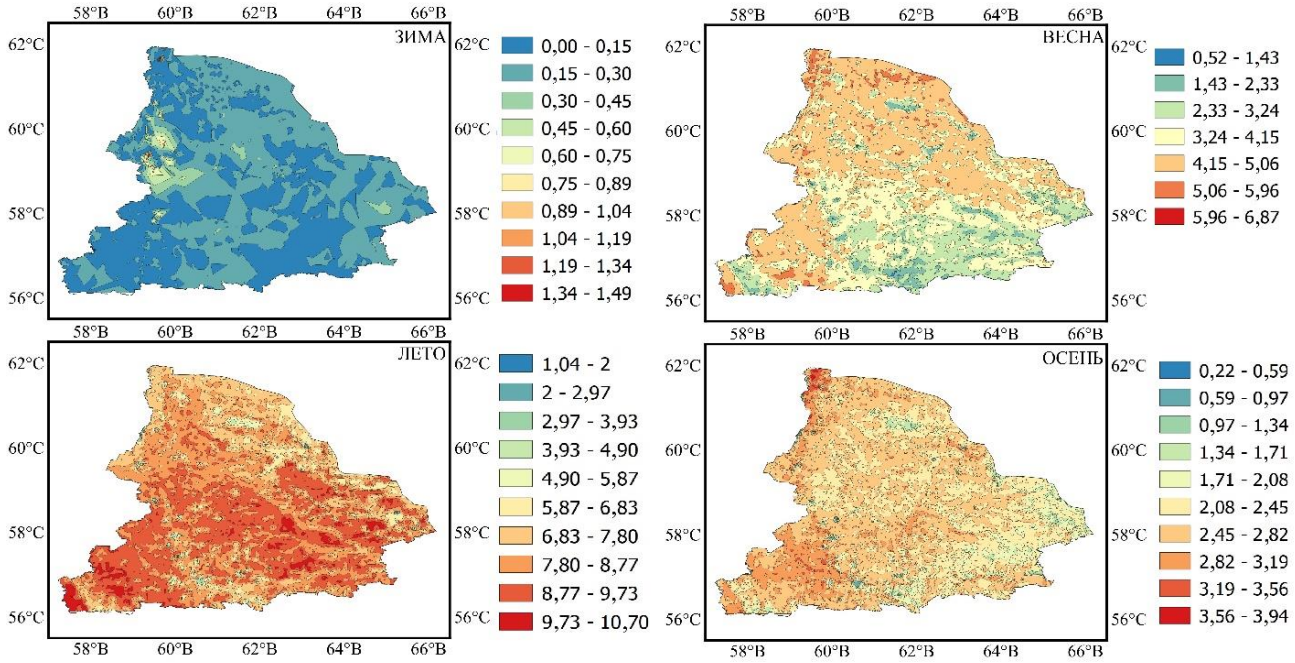

Рис. 3. Пространственное распределение GPP (гС·м⁻²·день⁻¹) по данным MODIS за 2014-2024 гг. для территории Свердловской области

4. Выводы

В настоящей работе представлена оценка суточных значений валовой первичной продукции (GPP) на территории Свердловской области за период 2014–2024 гг., полученная по измерениям спутниковой аппаратуры OCO-2 и MODIS.

На территории Свердловской области суточные значения GPP демонстрируют выраженный годовой цикл с максимумом в июне–июле (~ 7,4–7,5 гСм⁻²день⁻¹ по данным OCO-2 и ~ 8,5–8,6 гС·м⁻²·день⁻¹ по данным FluxSat) и минимумом с октября по апрель (~ 0,8–1,3 гСм⁻²день⁻¹ по данным OCO-2 и ~ 0,1– 1,5 гС·м⁻²·день⁻¹ по данным FluxSat), что согласуется с данными других исследований. Статистический анализ не выявил значимого линейного тренда GPP за исследованный период.

Пространственные паттерны GPP четко отражают климатические градиенты Свердловской области: более высокие летние максимумы на юге обусловлены более теплыми условиями и преобладанием лиственно-хвойных лесов.

Данные MODIS продемонстрировали свою пригодность для регионального мониторинга за счёт высокого пространственного разрешения и полного охвата территории, в то время как покрытие OCO-2 остается ограниченным.

5. Благодарности

Исследование выполнено за счет субсидий Министерства науки и высшего образования на выполнение научной темы FUMN-2024-0004.

6. Список литературы

1. IPCC. Climate Change 2021: The Physical Science Basis. Contribution of Working Group I to the Sixth Assessment Report of the Intergovernmental Panel on Climate Change / V. Masson-Delmotte, P. Zhai, A. Pirani [et al.] (eds.). – Cambridge, UK; New York, USA: Cambridge University Press, 2021. – 2391 p. – DOI 10.1017/9781009157896.
2. WMO Greenhouse Gas Bulletin (GHG Bulletin): The State of Greenhouse Gases in the Atmosphere Based on Global Observations through 2023. – 2024. – № 20. – 12 p.

3. *Дюкарев, Е. А.* Численное моделирование биогеохимических циклов углерода в болотных экосистемах / Е. А. Дюкарев, С. П. Семенов // Известия АлтГУ. Математика и механика. – 2022. – № 4 (126). – С. 104–109. – DOI 10.14258/izvasu(2022)4-16.
4. *Wang, M.* Synchronous Changes of GPP and Solar-Induced Chlorophyll Fluorescence in a Subtropical Evergreen Coniferous Forest / M. Wang, L. Zhang // Plants. – 2023. – Vol. 12, iss. 11. – Art. 2224. – DOI 10.3390/plants12112224.
5. Gross primary production, ecosystem respiration and net ecosystem exchange in Asian rice paddy: an eddy covariance-based approach / P. Bhattacharyya, S. Neogi, K. S. Roy, K. S. Rao // Current Science. – 2013. – Vol. 104, № 1. – P. 67–75.
6. Comparison of MODIS, eddy covariance determined and physiologically modelled gross primary production (GPP) in a Douglas-fir forest stand / N. C. Coops, T. A. Black, R. P. S. Jassal [et al.] // Remote Sensing of Environment. – 2007. – Vol. 107, № 3. – P. 385–401.
7. A global study of GPP focusing on light-use efficiency in a random forest regression model / S. Wei, C. Yi, W. Fang, G. A. Hendrey // Ecosphere. – 2017. – Vol. 8, № 5. – Art. e01724. – DOI 10.1002/ecs2.1724.
8. *Maxwell, K.* Chlorophyll fluorescence – a practical guide / K. Maxwell, G. N. Johnson // Journal of Experimental Botany. – 2000. – Vol. 51, № 345. – P. 659–668.
9. Global and time-resolved monitoring of crop photosynthesis with chlorophyll fluorescence / L. Guanter, Y. Zhang, M. Jung [et al.] // Proceedings of the National Academy of Sciences. – 2014. – Vol. 111, № 14. – P. E1327–E1333. – DOI 10.1073/pnas.1320008111.
10. Solar-induced chlorophyll fluorescence that correlates with canopy photosynthesis on diurnal and seasonal scales in a temperate deciduous forest / X. Yang, J. Tang, J. F. Mustard [et al.] // Geophysical Research Letters. – 2015. – Vol. 42, № 8. – P. 2977–2987. – DOI 10.1002/2015GL063201.
11. *Володин, Е. М.* Отклик совместной модели общей циркуляции атмосферы и океана на увеличение содержания углекислого газа / Е. М. Володин, Н. А. Дианский // Известия РАН. Физика атмосферы и океана. – 2003. – Т. 39, № 2. – С. 193–210.
12. *Manabe, S.* The effects of doubling of the CO_2 concentration on the climate of a general circulation model / S. Manabe, R. T. Wetherald // Journal of the Atmospheric Sciences. – 1975. – Vol. 32, № 1. – P. 3–15.
13. Global GOSAT, OCO-2, and OCO-3 solar-induced chlorophyll fluorescence datasets / R. Doughty, T. Kurosu, N. Parazoo [et al.] // Earth System Science Data. – 2022. – Vol. 14, № 3. – P. 1513–1529. – DOI 10.5194/essd-14-1513-2022.
14. OCO-2 Level 2 bias-corrected solar-induced fluorescence and other select fields from the IMAP-DOAS algorithm aggregated as daily files, Retrospective processing V10r / OCO-2 Science Team / M. Gunson, A. Eldering. – Greenbelt, MD, USA: GES DISC, 2020. – DOI 10.5067/XO2LBBNPO010. (дата обращения: 10.02.2026).
15. Daily FluxSat GPP of biomass over Land, Based on MODIS Terra and Aqua adjusted reflectance Collection 6.1, on a Global 0.05 by 0.05 Degree Grid, Level 3 [Data set]. – NASA Goddard Earth Sciences Data and Information Services Center, 2025. – DOI 10.5067/MEASURES/FLUXSAT/FLUXSATMGPP_L3_DAILY_P05DEG.2.2. (дата обращения: 10.02.2026.)
16. *Joiner, J.* Global MODIS and FLUXNET-derived Daily Gross Primary Production, V2 / J. Joiner, Y. Yoshida. – Oak Ridge, Tennessee, USA : ORNL DAAC, 2021. – DOI 10.3334/ORNLDAAC/1835.
17. *Li, X.* TROPOMI observations allow for robust exploration of the relationship between solar-induced chlorophyll fluorescence and terrestrial gross primary production / X. Li, J. Xiao // Remote Sensing of Environment. – 2022. – Vol. 268. – Art. 112748. – DOI 10.1016/j.rse.2021.112748.
18. ГОСТ 34100.3–2017/ISO/IEC Guide 98-3:2008. Неопределенность измерения. Часть 3. Руководство по выражению неопределенности измерения. – Москва : Стандартинформ, 2018. – 104 с.
19. *Джолумбетов, С. К.* Исследование особенностей изменения концентрации парниковых газов в атмосфере на территории Уральского региона по данным реанализа и спутниковых измерений. Часть 1. Пространственно-временные вариации концентрации CO_2 и CH_4 / С. К. Джолумбетов, Ю. И. Маркелов // Известия РАН. Физика атмосферы и океана. – 2025. – Т. 61, № 4. – С. 498–518. – DOI 10.7868/S3034648725040072.
20. *Sen, P. K.* Estimates of the regression coefficient based on Kendall's tau // Journal of the American Statistical Association. – 1968. – Vol. 63, № 324. – P. 1379–1389.

21. MCI GPP: ensembling a global model- and climate-independent gross primary productivity for 2001–2023 / J. Pu, Y. Chan, S. Gao [et al.] // Scientific Data. – 2025. – Vol. 12. – Art. 1965. – DOI 10.1038/s41597-025-06218-8.
22. Stability of gross primary productivity and its sensitivity to climate variability in China / X. Xu, F. Jiao, J. Liu [et al.] // Frontiers in Plant Science. – 2024. – Vol. 15. – Art. 1440993. – DOI 10.3389/fpls.2024.1440993.
23. CO_2 drove changes in global grassland GPP over the past decade / Z. Meng, Y. Hao, X. Liu [et al.] // Ecological Indicators. – 2026. – Vol. 182. – Art. 114552. – DOI 10.1016/j.ecolind.2025.114552.
24. VODCA2GPP – a new, global, long-term (1988–2020) gross primary production dataset from microwave remote sensing / B. Wild, I. Teubner, L. Moesinger [et al.] // Earth System Science Data. – 2022. – Vol. 14, № 3. – P. 1063–1085. – DOI 10.5194/essd-14-1063-2022.
25. *Mann, H. B.* Nonparametric tests against trend / H. B. Mann // Econometrica. – 1945. – Vol. 13, № 3. – P. 245–259.
26. *Kendall, M. G*. Rank correlation methods / M. G. Kendall. – 4th ed. – London: Charles Griffin, 1975. – 202 p.
27. *Годовалов, Г. А.* Районирование лесов Свердловской области / Г. А. Годовалов, С. В. Залесов, Е. Н. Лежнина // Аграрный вестник Урала. – 2011. – № 8 (87). – С. 38–39.
28. *Лагутин, А. А.* Оценки валовой первичной продукции для территории юга Западной Сибири в 2014–2021 гг. по данным орбитальных карбоновых обсерваторий OCO-2 и OCO-3 / А. А. Лагутин, Е. Ю. Мордвин, Н. В. Волков // Оптика атмосферы и океана. Физика атмосферы : материалы XXVIII Междунар. симпозиума (Томск, 04–08 июля 2022 г.). – Томск : Изд-во ИОА СО РАН, 2022. – С. В-328–В-331. – DOI 10.56820/OAOPA.2022.39.85.001.
29. Оценка валовой первичной продукции экосистемы Ленинградской области по данным спутниковой аппаратуры OCO-2 / С. Фока, М. Макарова, Е. Абакумов, Д. Ионов // Исследование Земли из космоса. – 2025. – № 3. – С. 37–46. – DOI 10.7868/S303454052503004.

Сведение об авторах:

Лужецкая Анна Павловна, к. ф.-м. н, м. н. с. Института промышленной экологии УрО РАН, г. Екатеринбург, Россия. Эл. почта: ann@ecko.uran.ru.

Джолумбетов Сергей Курмангазеевич, м. н. с. Института промышленной экологии УрО РАН, г. Екатеринбург, Россия. Эл.почта: S.K.Dzholumbetov@ecko.uran.ru.

Антонов Константин Леонидович, к. ф.-м. н, с. н. с. Института промышленной экологии УрО РАН, г. Екатеринбург, Россия. Эл. почта: antonov@ecko.uran.ru.

Наговицына Екатерина Сергеевна, к. ф.-м. н, н. с. Института промышленной экологии УрО РАН, г. Екатеринбург, Россия. Эл.почта: EkaterinaN@ecko.uran.ru.

GROSS PRIMARY PRODUCTION ESTIMATION FOR THE SVERDLOVSK REGION ECOSYSTEM USING OCO-2 AND MODIS DATASET

A. P. Luzhetskaya, S. K. Jolumbetov, K. L. Antonov, E. S. Nagovitsyna

Institute of Industrial Ecology, Ural Branch of the Russian Academy of Sciences, Yekaterinburg, Russia

In this study, the gross primary production (GPP) of the Sverdlovsk region for 2014–2024 was estimated using chlorophyll solar-induced fluorescence data from the OCO-2 satellite mission and the global FluxSat v2.2 product based on MODIS data. A pronounced annual GPP cycle was identified, with a maximum in June–July (~7,4–7,5 gC m^{-2} day^{-1} according to OCO-2 and ~8,5–8,6 gC·m^{-2}·day^{-1} according to FluxSat) and a minimum in October–April (~ 0,8–1,3 g C m^{-2} day^{-1} from OCO-2 and ~ 0,1–1,5 g C m^{-2} day^{-1} from FluxSat). Statistical analysis did not reveal a significant linear GPP trend over the study period. The spatial distribution of GPP reflects the region's climatic gradients: higher summer values in the south are due to a warmer climate and the predominance of deciduous-coniferous forests.

Keywords: gross primary productivity, OCO-2, FluxSat/MODIS, Sverdlovsk oblast, seasonal dynamics.

References

1. IPCC. Climate Change 2021: The Physical Science Basis. Contribution of Working Group I to the Sixth Assessment Report of the Intergovernmental Panel on Climate Change / V. Masson-Delmotte., P. Zhai, A. Pirani [et al.] (eds.). – Cambridge, UK; New York, USA: Cambridge University Press, 2021. – 2391 p. – DOI 10.1017/9781009157896.
2. WMO Greenhouse Gas Bulletin (GHG Bulletin): The State of Greenhouse Gases in the Atmosphere Based on Global Observations through 2023. – 2024. – № 20. – 12 p.
3. *Dyukarev, E. A.* Numerical Modeling of Biogeochemical Carbon Cycles in Swamp Ecosystems/ E. *A.* Dyukarev, S. P. Semenov // Izvestiya of Altai State University. – 2022. – № 4 (126). – P. 104–109. – DOI: 10.14258/izvasu(2022)4-16. (In Russian).
4. *Wang, M.* Synchronous Changes of GPP and Solar-Induced Chlorophyll Fluorescence in a Subtropical Evergreen Coniferous Forest / M. Wang, L. Zhang // Plants. – 2023. – Vol. 12, iss. 11. – Art. 2224. – DOI 10.3390/plants12112224.
5. Gross primary production, ecosystem respiration and net ecosystem exchange in Asian rice paddy: an eddy covariance-based approach / P. Bhattacharyya, S. Neogi, K. S. Roy, K. S. Rao // Current Science. – 2013. – Vol. 104, № 1. – P. 67–75.
6. Comparison of MODIS, eddy covariance determined and physiologically modelled gross primary production (GPP) in a Douglas-fir forest stand / N. C. Coops, T. A. Black, R. P. S. Jassal [et al.] // Remote Sensing of Environment. – 2007. – Vol. 107, № 3. – P. 385–401.
7. A global study of GPP focusing on light-use efficiency in a random forest regression model / S. Wei, C. Yi, W. Fang, G. A. Hendrey // Ecosphere. – 2017. – Vol. 8, № 5. – Art. e01724. – DOI 10.1002/ecs2.1724.
8. *Maxwell, K.* Chlorophyll fluorescence – a practical guide / K. Maxwell, G. N. Johnson // Journal of Experimental Botany. – 2000. – Vol. 51, № 345. – P. 659–668.
9. Global and time-resolved monitoring of crop photosynthesis with chlorophyll fluorescence / L. Guanter, Y. Zhang, M. Jung [et al.] // Proceedings of the National Academy of Sciences. – 2014. – Vol. 111, № 14. – P. E1327–E1333. – DOI 10.1073/pnas.1320008111.
10. Solar-induced chlorophyll fluorescence that correlates with canopy photosynthesis on diurnal and seasonal scales in a temperate deciduous forest / X. Yang, J. Tang, J. F. Mustard [et al.] // Geophysical Research Letters. – 2015. – Vol. 42, № 8. – P. 2977–2987. – DOI 10.1002/2015GL063201.
11. *Volodin, E.M.* Response of the coupled atmosphere-ocean general circulation model to an increase in carbon dioxide concentration / E.M. Volodin, N.A. Diansky // Izvestiya, Atmospheric and Oceanic Physics. – 2003. – Vol. 39, – №. 2. – P. 193–210. (In Russian).

12. *Manabe, S.* The effects of doubling of the CO_2 concentration on the climate of a general circulation model / S. Manabe, R. T. Wetherald // Journal of the Atmospheric Sciences. – 1975. – Vol. 32, № 1. – P. 3–15.
13. Global GOSAT, OCO-2, and OCO-3 solar-induced chlorophyll fluorescence datasets / R. Doughty, T. Kurosu, N. Parazoo [et al.] // Earth System Science Data. – 2022. – Vol. 14, № 3. – P. 1513–1529. – DOI 10.5194/essd-14-1513-2022.
14. OCO-2 Level 2 bias-corrected solar-induced fluorescence and other select fields from the IMAP-DOAS algorithm aggregated as daily files, Retrospective processing V10r / OCO-2 Science Team / M. Gunson, A. Eldering. – Greenbelt, MD, USA: GES DISC, 2020. – DOI 10.5067/XO2LBBNPO010. Accessed: [10.02.2026].
15. Daily FluxSat GPP of biomass over Land, Based on MODIS Terra and Aqua adjusted reflectance Collection 6.1, on a Global 0.05 by 0.05 Degree Grid, Level 3 [Data set]. – NASA Goddard Earth Sciences Data and Information Services Center, 2025. – DOI 10.5067/MEASURES/FLUXSAT/FLUXSATMGPP_L3_DAILY_P05DEG.2.2. Accessed: [10.02.2026].
16. *Joiner, J.* Global MODIS and FLUXNET-derived Daily Gross Primary Production, V2 / J. Joiner, Y. Yoshida. – Oak Ridge, Tennessee, USA: ORNL DAAC, 2021. – DOI 10.3334/ORNLDAAC/1835.
17. *Li, X.* TROPOMI observations allow for robust exploration of the relationship between solar-induced chlorophyll fluorescence and terrestrial gross primary production / X. Li, J. Xiao // Remote Sensing of Environment. – 2022. – Vol. 268. – Art. 112748. – DOI 10.1016/j.rse.2021.112748.
18. GOST 34100.3–2017 / ISO/IEC Guide 98-3:2008. Measurement uncertainty. Part 3: Guide to the expression of uncertainty in measurement. – Moscow: Standartinform, 2018. – 104 p.
19. *Dzholumbetov, S.K.* Study of changes in the concentration of greenhouse gases in the atmosphere in the Ural region based on reanalysis and satellite measurements. Part 1. Spatial-temporal variations in the CO and CH concentration / S.K. Dzholumbetov, Y.I. Markelov // Izvestiya, Atmospheric and Oceanic Physics. – 2025. – Vol. 61, № 4. – P. 498-518. – DOI 10.7868/S3034648725040072.
20. *Sen, P. K.* Estimates of the regression coefficient based on Kendall's tau // Journal of the American Statistical Association. – 1968. – Vol. 63, № 324. – P. 1379–1389.
21. MCI GPP: ensembling a global model- and climate-independent gross primary productivity for 2001–2023 / J. Pu, Y. Chan, S. Gao [et al.] // Scientific Data. – 2025. – Vol. 12. – Art. 1965. – DOI 10.1038/s41597-025-06218-8.
22. Stability of gross primary productivity and its sensitivity to climate variability in China / X. Xu, F. Jiao, J. Liu [et al.] // Frontiers in Plant Science. – 2024. – Vol. 15. – Art. 1440993. – DOI 10.3389/fpls.2024.1440993.
23. CO_2 drove changes in global grassland GPP over the past decade / Z. Meng, Y. Hao, X. Liu [et al.] // Ecological Indicators. – 2026. – Vol. 182. – Art. 114552. – DOI 10.1016/j.ecolind.2025.114552.
24. VODCA2GPP – a new, global, long-term (1988–2020) gross primary production dataset from microwave remote sensing / B. Wild, I. Teubner, L. Moesinger [et al.] // Earth System Science Data. – 2022. – Vol. 14, № 3. – P. 1063–1085. – DOI 10.5194/essd-14-1063-2022.
25. *Mann, H. B.* Nonparametric tests against trend / H. B. Mann // Econometrica. – 1945. – Vol. 13, № 3. – P. 245–259.
26. *Kendall, M. G*. Rank correlation methods / M. G. Kendall. – 4th ed. – London: Charles Griffin, 1975. – 202 p.
27. *Godovalov, G.A.* Forest zoning of Sverdlovsk oblast / G.A. Godovalov, S.V. Zalesov, E. N. Lezhnina // Agrarian Bulletin of the Urals. – 2011. – № 8 (87). – P. 38–39. (In Russian).
28. *Lagutin, A. A.* Estimates of gross primary production for the territory of southern Western Siberia in 2014–2021 based on data from orbiting carbon observatories OCO-2 and OCO-3 / A. A. Lagutin, E. Yu. Mordvin, N. V. Volkov // Optika atmosfery i okeana. Fizika atmosfery: Proceedings of the XXVIII International Symposium (Tomsk, 4–8 July 2022). – Tomsk: Publishing of IOA SB RAS, 2022. – P. B-328–B-331. – DOI 10.56820/OAOPA.2022.39.85.001. (In Russian).
29. Assessment of gross primary productivity of the Leningrad region ecosystem using OCO-2 satellite data / S. Foka, M. Makarova, E. Abakumov, D. Ionov // Russian Journal of Remote Sensing. – 2025. – №. 3. – P. 37–46. – DOI 10.7868/S303454052503004. (In Russian).