

ИСПОЛЬЗОВАНИЕ КОСМИЧЕСКОЙ ИНФОРМАЦИИ О ЗЕМЛЕ

ОЦЕНКА ВАЛОВОЙ ПЕРВИЧНОЙ ПРОДУКЦИИ ЭКОСИСТЕМЫ ЛЕНИНГРАДСКОЙ ОБЛАСТИ ПО ДАННЫМ СПУТНИКОВОЙ АППАРАТУРЫ ОСО-2

© 2025 г. С. Ч. Фока¹ *, М. В. Макарова¹, Е. В. Абакумов¹, Д. В. Ионов¹

¹Санкт-Петербургский государственный университет, Санкт-Петербург, Россия

*E-mail: s.foka@spbu.ru

Поступила в редакцию 13.09.2024 г.

В России для реализации мер контроля климатически активных газов и исследований потенциала поглощения парниковых газов было начато создание карбоновых полигонов, которые включают в себя репрезентативные экосистемы, характерные для территории нашей страны. Количественная оценка валовой первичной продукции GPP (gross primary production) и понимание процессов, влияющих на нее, необходимы для изучения процессов поглощения CO₂ экосистемой, характерной для Северо-Запада России, что является одной из целей карбонового полигона “Ладога”, планируемого к созданию в 2024–2025 гг. на территории Ленинградской области. GPP для территории Ленинградской области в 2014–2022 гг. была определена с использованием индуцированного солнечным светом флуоресцентного излучения хлорофилла, измеренного спутниковой аппаратурой ОСО-2. Было получено, что для GPP характерен годовой ход с максимальными значениями в июне–июле, что согласуется с результатами независимых исследований. За рассмотренный период скорость роста GPP была положительна и составила 0.08 ± 0.02 гСм⁻²день⁻¹год⁻¹. Поглощательная способность карбонового полигона “Ладога”, полученная в настоящей работе, составила 0.1–2.3 ктСО₂год⁻¹. Полученные результаты могут быть использованы в качестве априорных оценок для наземных измерений на территории полигона “Ладога”, а также для независимых оценок потенциала поглощения CO₂ на территории России.

Ключевые слова: южная тайга, средняя тайга, индуцированное солнечным светом флуоресцентное излучение хлорофилла, валовая первичная продукция, тренд, поглощательная способность экосистем

DOI: 10.7868/S3034540525030048

ВВЕДЕНИЕ

Изменения климата – важная проблема XXI века. Последние 10 лет (2014–2023 гг.) стали самыми теплыми за всю историю наблюдений, средняя глобальная температура была на 1.19 ± 0.12 °C выше значений, зарегистрированных в доиндустриальный период. В настоящее время отмечается увеличение количества экстремальных погодных и климатических явлений (крупные наводнения, тропические циклоны, сильная жара, засуха, лесные пожары), оказывающих серьезное воздействие на все населенные континенты (Annual Report, 2023).

Для удержания роста средней глобальной температуры – предотвращения превышения доиндустриального уровня температуры на 1.5°C – необходимо существенно сократить антропогенные выбросы и, в перспективе, достичь углеродной нейтральности. Это возможно при достоверной количественной оценке выбросов парниковых газов в атмосферу и учете величины поглощения климатически активных газов (WMO, 2023).

Именно по этой причине в России для реализации мер контроля климатически активных газов и исследований потенциала поглощения парниковых газов было начато создание карбоновых полигонов, которые включают в себя репрезентативные экосистемы, характерные для территории нашей страны. В настоящий момент на территории России уже действует 19 карбоновых полигонов (Карбоновые полигоны, 2024). В 2024–2025 гг. на территории земельного участка, принадлежащего Федеральному государственному бюджетному учреждению “Главная геофизическая обсерватория им. А.И.Воейкова” (ФГБУ “ГГО”) (~150.6 га, Ленинградская область, п. Воейково) (Макарова et al., 2023) планируется к созданию карбоновый полигон “Ладога”, задачей которого будет являться мониторинг потоков климатически активных газов, а также оценка потенциала поглощения парниковых газов экосистемой, характерной для Северо-Запада России (зона южной тайги и зона средней тайги на севере Ленинградской области).

Величиной, характеризующей количество поглощенного растительностью углекислого газа (CO_2) на единицу площади в результате процессов фотосинтеза (Дюкарев и др., 2022; Wang et al., 2023), является валовая первичная продукция (GPP – gross primary production). Значения GPP позволяют оценить потенциал поглощения CO_2 на территории Ленинградской области и на территории полигона “Ладога”.

В настоящее время существуют различные способы оценки GPP: 1) с использованием наземных измерений (метод турбулентных пульсаций и метод исследования биомассы); 2) в результате моделирования; 3) по измерениям отражательной способности растительности в ближнем инфракрасном диапазоне (NIRv); 4) по измерениям индуцированного солнечным светом флуоресцентного излучения хлорофилла (SIF) (Liao et al., 2023).

Наиболее эффективным индикатором фотосинтеза растений является индуцированное солнечным светом флуоресцентное излучение хлорофилла, SIF (solar-induced chlorophyll fluorescence), спектральный диапазон которого составляет ~650–800 нм. Подтвержденная в работах линейная зависимость между SIF и GPP позволяет с использованием спутниковых измерений SIF оценить количество CO_2 , поглощенного растениями в региональных и глобальных масштабах, без привязки к наземным измерениям (Li et al., 2022).

Впервые спутниковый мониторинг SIF стал возможен в 2006 году после запуска Европейским космическим агентством ESA на борту спутника MetOp-A радиометра GOME-2. Однако низкое пространственное разрешение спутников (40×80 км до 2013 г. и 40×40 км после 2013 г.) приводило к большой неопределенности значений GPP. С 2014 года, после запуска Национальным управлением по аэронавтике и исследованию космического пространства NASA спутниковой обсерватории OCO-2, начались непрерывные измерения SIF с высоким пространственным разрешением (1.3×2.25 км). С 2018 года на борту спутника Sentinel-5P, запущенного агентством ESA, начались измерения SIF спектрометром TROPOMI с пространственным разрешением (7×3.5 км) (Duvalier et al., 2020; Doughty et al., 2022; Liao et al., 2023).

Несмотря на то, что оценка GPP уже была представлена для территорий Западной Сибири с использованием спутниковых измерения OCO-2 (Лагутин и др., 2022) и для Тверской области с использованием наземных измерений (Mamkin et al., 2022), независимые оценки по данным спутниковых измерений на территории Ленинградской области позволят оценить поглощательную способность, ее годовые и долговременные вариации, характерные для зоны южной тайги и зоны средней тайги.

Целью данной работы является количественная оценка GPP и ее временные вариации, характерные для территории Ленинградской области ($59^\circ\text{--}61.2^\circ$ с.ш., $28^\circ\text{--}35.3^\circ$ в.д.) по долговременным спутниковым измерениям 2014–2022 гг. с использованием SIF, измеренного спутниковой аппаратурой OCO-2. Также в работе представлена оценка поглощательной способности экосистем, характерных для карбонового полигона “Ладога”. Полученные результаты могут быть в дальнейшем использованы в качестве априорных оценок для наземных измерений.

Статья имеет следующую структуру:

- введение;
- материалы и методы исследования, где дано краткое описание используемых данных, методы получения и анализа значений валовой первичной продукции для Ленинградской области, а также подходы к оценке потенциала поглощения CO_2 для территории Ленинградской области и для участка карбонового полигона “Ладога”;
- результаты и их обсуждение, где представлены годовые вариации и тренд GPP, оценка потенциала поглощения CO_2 для территории Ленинградской области и для участка карбонового полигона “Ладога”, а также, сравнение с независимыми источниками;
- заключение, где представлены основные результаты работы.

МАТЕРИАЛЫ И МЕТОДЫ ИССЛЕДОВАНИЯ

В данной работе проводилась оценка валовой первичной продукции (GPP) на территории Ленинградской области ($59^\circ\text{--}61.2^\circ$ с.ш., $28^\circ\text{--}35.3^\circ$ в.д.) с использованием данных SIF, измеренных спутниковой аппаратурой OCO-2. Спутник находится на орбите высотой 705 км, период его обращения составляет 98.8 минут, время пересечения экватора около 13:36 по местному времени, траектории сканирования на поверхности Земли могут приблизительно повторяться каждые 16 дней. Аппаратура OCO-2 измеряет SIF на длинах волн 757 и 771 нм с высоким пространственным разрешением (1.3×2.25 км), однако для оценки GPP принято использовать SIF на длине волны 740 нм, на которую приходится максимум излучения хлорофилла. Поэтому для OCO-2 расчет значений SIF_{740} осуществляется с использованием следующей формулы (Doughty et al., 2022):

$$\text{SIF}_{740} = 0.75 \cdot (\text{SIF}_{757} + 1.5 \cdot \text{SIF}_{771}), \quad (1)$$

где SIF_{740} , SIF_{757} , SIF_{771} – индуцированное солнечным светом флуоресцентное излучение хлорофилла на длине волны 740, 757, 771 нм, соответственно.

Значения SIF_{740} , полученные с использованием алгоритмов обработки данных ОСО-2 (Doughty et al., 2022), были загружены из репозитория NASA ESDS (Earth Science Data Systems) (ОСО-2, 2020) за период с сентября 2014 г. по февраль 2022 г. В нашей работе для оценки GPP использовались данные, удовлетворяющие условию: $SIF+2\sigma \geq 0$ (Doughty et al., 2022), где σ – среднеквадратичное отклонение (СКО) многократного зондирования. Число дней измерений в разные годы варьировалось от 2 до 84, а количество собственных измерений в сутки – от 16 до 1010, что обусловлено облачным состоянием атмосферы в период измерений и продолжительностью измерений. Для каждого дня наблюдений рассчитывали среднее значение SIF и его стандартные ошибки. Далее на основе полученных данных рассчитывались среднесуточные значения GPP и их стандартные ошибки (точки и полосы ошибок на рис. 1). С учетом того, что существует линейная зависимость между SIF и GPP (Chen et al., 2021; Liao et al., 2023), для получения оценок GPP использовалось эмпирическое соотношение (табл. 1):

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

где GPP [$гСм^{-2}день^{-1}$] – валовая первичная продукция, k [$гСм^{-2}день^{-1}/Втм^{-2}мкм^{-1}ср^{-1}$] – коэффициент линейной зависимости, SIF [$Втм^{-2}мкм^{-1}ср^{-1}$] – индусированное солнечным светом флуоресцентное излучение хлорофилла.

В связи с тем, что измерения SIF TROPOMI и SIF ОСО-2 хорошо согласуются между собой (Köhler et al., 2018; Guanter et al., 2021), то из работы (Li et al., 2022), основанной на анализе данных SIF TROPOMI и их верификации с наземными измерениями, были взяты коэффициенты k для различных типов растительности (табл. 1). Распределение типа растительности на территории Ленинградской области взято из статьи (Makarova et al., 2023) (табл. 1).

РЕЗУЛЬТАТЫ И ОБСУЖДЕНИЕ

Годовые вариации и тренд GPP. Как видно из рис. 1, для GPP на территории Ленинградской области, включающей в себя как зону южной тайги, так и среднюю таежную зону, характерен годовой ход, максимум которого приходится на июнь, минимум – в период с октября по апрель (табл. 2, рис. 1, 2), что согласуется с результатами независимых исследований (Cui et al., 2017; Лагутин и др., 2022; Mamkin et al., 2022; Vo et al., 2022). Кроме того, максимальные значения GPP в летний период ($9–11 гСм^{-2}день^{-1}$), рассчитанные по данным ОСО-2, сопоставимы с GPP для зоны смешанных лесов, представленными в работе Lin et al. (2022), $\sim 10–12 гСм^{-2}день^{-1}$.

Для оценки наблюдающихся долговременных тенденций в рядах данных GPP использовалась программа CCGCRV NOAA (Thoning et al., 1989). Эта программа аппроксимирует данные функцией, представляющей собой комбинацию полинома и годовых гармоник. В данной работе использовалась функция, состоящая из комбинации линейного полинома и годовой гармоник. Сначала находятся коэффициенты аппроксимирующей функции методом наименьших квадратов. Затем регрессионные остатки полученной функции сглаживаются с помощью фильтра нижних частот (50 дней). Далее для удаления любых оставшихся годовых циклов, которые все еще присутствуют после подбора функции, используется долгосрочный фильтр (667 дней). Для нахождения тренда суммируется полиномиальная часть функции и регрессионные остатки после долгосрочной фильтрации. Таким образом, скоростью роста является первая производная кривой тренда. Исходные данные, сглаженные данные (данные с учетом краткосрочной фильтрации) и тренд в виде аппроксимирующей функции скорости роста представлены на рис. 1.

За рассмотренный период (2014–2022 гг.) скорость роста GPP составила $0.08 \pm 0.02 гСм^{-2}день^{-1}год^{-1}$, что сопоставимо со скоростью роста, полученной

Таблица 1. Распределение типа растительности на территории Ленинградской области

	Площадь, тыс. га	Среднее значение коэффициента k , $гСм^{-2}день^{-1}/Втм^{-2}мкм^{-1}ср^{-1}$	% соотношения от всей рассматриваемой области
Пахотная земля	359.00	15.42	23.33
Кустарник	36.40	13.22	2.37
Сенокос	119.60	12.59	7.77
Пастбище	101.00	12.59	6.56
Лес	923.00	12.50	59.97
Вся площадь	1539.00		100

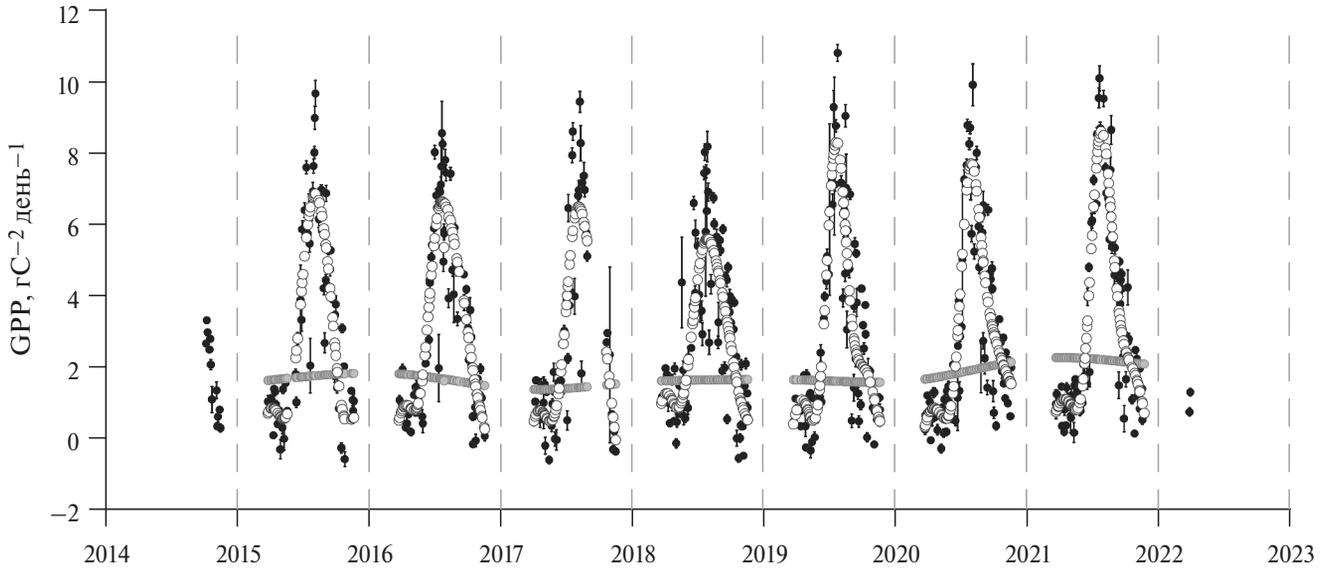


Рис. 1. Значения валовой первичной продукции (GPP) и ее стандартные ошибки 2014–2022 гг. по данным спутниковой аппаратуры ОСО-2 – точки и линии погрешности измерений; сглаженные данные – белые точки, аппроксимирующая функция скорости роста GPP – серая линия.

для хвойных лесов в Германии (Wild et al., 2022) в 2003–2014 гг: $0.07 \text{ гСм}^{-2}\text{день}^{-1}\text{год}^{-1}$ с нижней и верхней границами доверительного интервала ($-0.017-0.1325 \text{ гСм}^{-2}\text{день}^{-1}\text{год}^{-1}$), и со скоростью роста, полученной для широколиственных лесов в США (Wild et al., 2022) в 2003–2013 гг: $0.051 \text{ гСм}^{-2}\text{день}^{-1}\text{год}^{-1}$ с нижней и верхней границами доверительного интервала ($0.0037-0.0965 \text{ гСм}^{-2}\text{день}^{-1}\text{год}^{-1}$), все значения имеют положительную динамику в разные периоды времени. Таким образом, за последние 7 лет для экосистем Ленинградской области наблюдается статистически значимая тенденция к увеличению валовой первичной продукции. Это может быть связано с постоянным увеличением концентрации CO_2 в атмосфере как в глобальном масштабе, так и на территории Ленинградской области (Launiainen et al., 2022; Ji et al., 2024; NOAA, 2024; Foka et al., 2024).

Углеродный баланс экосистемы. Для оценки углеродного баланса экосистемы (NEE – net ecosystem exchange) необходимо учитывать, сколько было поглощено CO_2 растениями в результате фотосинтеза (GPP) и сколько было выделено в результате дыхания экосистемы (R_e – ecosystem respiration), в котором учитывается дыхание растений (автотрофное дыхание) и дыхание другими организмами (гетеротрофное дыхание) (Xiao et al., 2011; Cho et al., 2021):

$$\text{NEE}(t) = \text{GPP}(t) - R_e(t), \quad (3)$$

где $\text{NEE}(t)$ [$\text{кгСм}^{-2}\text{год}^{-1}$] – поглощательная способность экосистемы, $\text{GPP}(t)$ [$\text{кгСм}^{-2}\text{год}^{-1}$] – ва-

ловая первичная продукция, $R_e(t)$ [$\text{кгСм}^{-2}\text{год}^{-1}$] – дыхание экосистемы.

Для расчета годовых значений GPP мы воспользовались среднемесячными значениями (GPP_{mean}), их минимумами (GPP_{min}) и максимумами (GPP_{max}), рассчитанными на основе имеющихся данных спутниковых изменений (табл. 2, 3).

Таблица 2. Среднемесячные значения GPP со среднеквадратичным отклонением (СКО), минимальные и максимальные значения GPP по данным ОСО-2 для Ленинградской области с 2014 по 2021 гг ($\text{GPP}_{\text{mean}} \pm \sigma$, GPP_{min} , GPP_{max})

Месяц	GPP, $\text{гСм}^{-2}\text{день}^{-1}$		
	$\text{GPP}_{\text{mean}} \pm \sigma$	GPP_{min}	GPP_{max}
2	0.9 ± 0.2	0.7	1.4
3	1.3 ± 0.7	0.7	2.5
4	1.0 ± 0.1	0.8	1.1
5	3.1 ± 0.8	1.8	4.1
6	7.0 ± 0.9	5.6	8.3
7	6.3 ± 0.6	5.3	7.1
8	3.9 ± 0.5	2.9	4.3
9	2.0 ± 0.3	1.3	2.5
10	0.9 ± 0.4	0.6	1.5

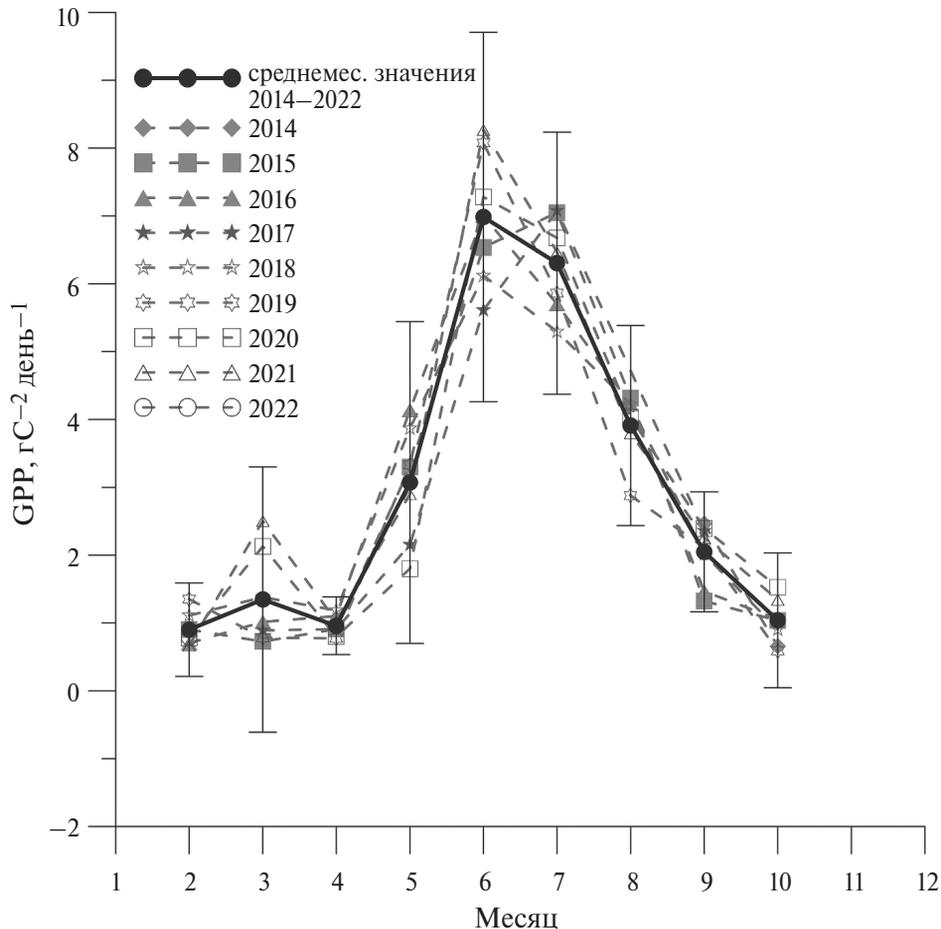


Рис. 2. Среднемесячные значения GPP с учетом среднеквадратичного отклонения (3σ) — темно-серые круги и линии погрешности измерений; среднемесячные значения для каждого месяца в зависимости от года — различные фигуры, соединенные пунктиром.

В результате было установлено, что GPP_{mean} составляет $0.81 \text{ кгСм}^{-2}\text{год}^{-1}$, с диапазоном значений $0.60\text{--}1.00 \text{ кгСм}^{-2}\text{год}^{-1}$. Полученные результаты хорошо согласуются с годовыми значениями GPP для хвойных лесов (подзона средней тайги) в Швеции (Schacherl, 2021) и близки к годовому значению GPP для смешанных лесов в Тверской области (подзона южной тайги) — $1.15\text{--}1.91 \text{ кгСм}^{-2}\text{год}^{-1}$ (Mamkin et al., 2022).

Далее для оценки экосистемного обмена необходимо было учитывать дыхание экосистемы. Экспериментально рассчитанное дыхание экосистемы (Goulden et al., 2011; Schacherl, 2021) варьируется в зависимости от местоположения станции, климатических особенностей и возраста растений: $0.54\text{--}0.72 \text{ кгСм}^{-2}\text{год}^{-1}$ (Schacherl, 2021); $0.4 \text{ кгСм}^{-2}\text{год}^{-1}$, если возраст растения <20 лет; $0.6 \text{ кгСм}^{-2}\text{год}^{-1}$, если возраст растения >20 лет (Goulden et al., 2011). В нашей работе мы использовали среднее значение $\sim 0.58 \text{ кгСм}^{-2}\text{год}^{-1}$, полученное по литературным данным.

Положительные средние значения NEE (NEE_{mean}), оцененные с помощью GPP_{mean} , указывают на то, что экосистема поглощает CO_2 . Для сравнения с другими литературными источниками NEE был преобразован в NEE_{CO_2} . Полученные средние значения NEE_{CO_2} , рассчитанные для лесов Ленинградской области, оказались близкими к нижней границе диапазона минимальных значений поглощательной способности лесов Ленинградской области, представленных в работе Makarova et al. (2023). Кроме того, была проведена оценка поглощательной способности для гипотетических карбоновых ферм на территории Ленинградской области площадью 677.9 тыс. га ($NEE_{\text{CO}_2, carb}$) и для территории карбонового полигона Ладоса ($NEE_{\text{CO}_2, Ladoga}$) площадью 150.6 га. Полученные средние значения $NEE_{\text{CO}_2, carb}$, рассчитанные для гипотетических углеродных ферм, имеют широкий диапазон значений поглощательной способности. Однако $NEE_{\text{CO}_2, carb}$, полученные с использованием значений GPP_{mean} , оказались близки к нижним

Таблица 3. Годовые значения GPP, NEE, NEE_{CO₂}, NEE_{CO₂,carb}, NEE_{CO₂,Ladoga}

	GPP, кгСм ⁻² год ⁻¹	NEE, кгСм ⁻² год ⁻¹	NEE _{CO₂} , кгСм ⁻² год ⁻¹	NEE _{CO₂,carb} , кгСм ⁻² год ⁻¹ 677.9 тыс. га	NEE _{CO₂,Ladoga} , кгСм ⁻² год ⁻¹ 150.6 га
GPP _{min}	0.60	0.02	0.1	493	0.1
GPP _{mean}	0.81	0.23	0.8	5624	1.2
GPP _{max}	1.00	0.42	1.5	10487	2.3
В литературе	смешанные леса: 1.15–1.91 2016–2020 (Mamkin et al., 2022) хвойные леса: 0.79–1.12 2015–2020 Швеция (Schacherl, 2021)		0.6–3.4 леса Ленинградской области (Makarova et al., 2023)	3000–16000 Ленинградская область (лесные экосистемы, площадь 4719.0 тыс. га) (Makarova et al., 2023) 1800–5600 (лесопосадки Ленинградской области, площадь 677.9 тыс. га) (Ma- karova et al., 2023)	

пределам общего годового поглощения CO₂ (3000–16000 кгСм⁻²год⁻¹) для земель лесного фонда (площадь 4719.0 тыс. га) (Makarova et al., 2023), и сопоставимы с верхними пределами потенциала поглощения CO₂ (1800–5600 кгСм⁻²год⁻¹), полученными для общей площади карбоновых полигонов и потенциальных ферм (Makarova et al., 2023). Это связано с тем, что в работе Makarova et al. (2023) при расчете поглощательной способности общей площади карбоновых ферм NEE_{CO₂,carb} использовалось нижнее значение поглощательной способности (NEE_{CO₂} ~0.55 кгСм⁻²год⁻¹).

Поглощательная способность экосистемы полигона NEE_{CO₂,Ladoga} составила 0.1–2.3 кгСм⁻²год⁻¹. Учитывая, что рассчитанные значения NEE_{CO₂} для Ленинградской области (табл. 3) продемонстрировали хорошее согласие с данными, представленными в работе (Makarova et al. 2023), можно сделать вывод о том, что полученная поглощательная способность территории полигона, вероятно, также близка к реальным значениям.

Несмотря на возможность определения GPP по данным спутниковых наблюдений, следует учитывать наличие больших вариаций этих значений и отсутствия данных в случае высокой облачности атмосферы, что может приводить к значительным неопределенностям при рассмотрении таких параметров, как поглощательная способность. Таким образом, для определения более точного баланса экосистем на территории Ленинградской области и на территории карбонового полигона “Ладоба”

необходимо проведение непрерывных наземных измерений потоков парниковых газов и метеорологических характеристик.

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

В работе представлена оценка суточных значений GPP в Ленинградской области в 2014–2022 гг. с использованием индуцированного солнечным светом излучения хлорофилла (SIF), измеренного спутниковой аппаратурой ОСО-2.

Было выявлено, что на территории Ленинградской области значения GPP характеризуются годовым циклом с максимумом в июне–июле и минимумом в период с октября по апрель, что сопоставимо с результатами независимых исследований. Максимальные суточные значения GPP летом составляют 9–11 гСм⁻²день⁻¹.

За рассмотренный период скорость роста GPP положительна, 0.08±0.02 гСм⁻²день⁻¹год⁻¹.

Для оценки поглощательной способности NEE для Ленинградской области, для гипотетических карбоновых ферм на территории Ленинградской области площадью 677.9 тыс. га (NEE_{CO₂,carb}) и для территории карбонового полигона Ладоба (NEE_{CO₂,Ladoga}) площадью 150.6 га, было рассчитано годовое значение GPP, составившее 0.81 кгСм⁻²год⁻¹.

Поглощательная способность карбонового полигона NEE_{CO₂,Ladoga} составила 0.1–2.3 кгСм⁻²год⁻¹.

Учитывая, что рассчитанные значения NEE_{CO_2} для Ленинградской области (табл. 3) продемонстрировали хорошее согласие с данными, представленными в работе (Макарова et al., 2023), можно сделать вывод о том, что полученная поглощательная способность территории полигона, вероятно, также близка к реальным значениям.

Несмотря на то, что определить GPP можно по спутниковым наблюдениям, важно учитывать, что существуют большие вариации этих значений и пробелы в данных в результате высокой атмосферной облачности, что может привести к значительным неопределенностям при рассмотрении таких параметров, как поглощательная способность. Таким образом, для более точной оценки углеродного баланса экосистем Ленинградской области, особенно на территории карбонового полигона “Ладога”, необходимо проводить непрерывные наземные измерения потоков парниковых газов и метеорологических характеристик.

ИСТОЧНИК ФИНАНСИРОВАНИЯ

Работа была выполнена при поддержке СПбГУ, шифр проекта 123042000071-8 (ID проекта 132271892).

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

- Дюкарев Е.А., Семенов С.П. Численное моделирование биогеохимических циклов углерода в болотных экосистемах // Известия АлтГУ. Математика и механика. 2022. № 4 (126). С. 104–109. DOI: 10.14258/izvasu(2022)4-16.
- Карбоновые полигоны Российской Федерации <https://carbon-polygons.ru/> (дата обращения 12.11.2024)
- Лагутин А.А., Мордвин Е.Ю., Волков Н.В. Оценки валовой первичной продукции для территории юга Западной Сибири в 2014–2021 гг. по данным орбитальных карбоновых обсерваторий ОСО-2 И ОСО-3 // Материалы XXVIII Международного симпозиума “Оптика атмосферы и океана. Физика атмосферы”. [Электронный ресурс]. Томск: Изд-во ИОА СО РАН, 2022. С. В-328-В-331. DOI: 10.56820/OAOPA.2022.39.85.001.
- Annual report: Provisional State of the Global Climate 2023, <https://wmo.int/files/provisional-state-of-global-climate-2023> (дата обращения 26.02.2024)
- Bo Y., Li X., Liu K., Wang S., Zhang H., Gao X., Zhang X. Three decades of gross primary production (GPP) in China: variations, trends, attributions, and prediction inferred from multiple datasets and time series modeling // Remote Sens. 2022. V. 14. № 11:2564. DOI: 10.3390/rs14112564.
- Chen A., Mao J., Ricciuto D., Lu D., Xiao J., Li X., Thornton P.E., Knapp A.K. Seasonal changes in GPP/SIF ratios and their climatic determinants across the Northern Hemisphere // Glob. Chang. Biol. 2021. V. 27. P. 5186–5197. DOI: 10.1111/gcb.15775.
- Cho S., Kang M., Ichii K., Kim J., Lim J.H., Chun J.H., Park C.W., Kim H.S., Choi S.W., Lee S.H., Indrawati Y.M., Kim J. Evaluation of forest carbon uptake in South Korea using the national flux tower network, remote sensing, and data-driven technology // Agric. For Meteorol. 2021. V. 311. № 108653. DOI: 10.1016/j.agrformet.2021.108653.
- Cui Y., Xiao X., Zhang Y., Dong J., Qin Y., Doughty R.B., Zhang G., Wang J., Wu X., Qin Y., Zhou S., Joiner J., Moore B. Temporal consistency between gross primary production and solar-induced chlorophyll fluorescence in the ten most populous megacity areas over years // Sci. Rep. 2017. V. 7. № 14963. DOI: 10.1038/s41598-017-13783-5.
- Doughty R., Kurosu T.P., Parazoo N., Köhler P., Wang Y., Sun Y., Frankenberg C. Global GOSAT, OCO-2, and OCO-3 solar-induced chlorophyll fluorescence datasets // Earth. Syst. Sci. Data. 2022. V. 14. P. 1513–1529. DOI: 10.5194/essd-14-1513-2022.
- Duveiller G., Filipponi F., Walther S., Köhler P., Frankenberg C., Guanter L., Cescatti A. A spatially downscaled sun-induced fluorescence global product for enhanced monitoring of vegetation productivity // Earth. Syst. Sci. Data. 2022. V. 12. P. 1101–1116. DOI: 10.5194/essd-12-1101-2020.
- Foka S.C., Makarova M.V., Poberovsky A.V., Ionov D.V., Abakumov E.V. Analysis of mixing ratios of greenhouse carbon-containing gases at the atmospheric monitoring station of St. Petersburg State University // Atmos. Ocean. Opt. 2024. V. 37. P. 74–81. DOI: 10.1134/S1024856023700094.
- Goulden M.L., Mcmillan A.M.S., Winston G.C., Rocha A.V., Manies K.L., Harden J.W., Bond-Lamberty B.P. Patterns of NPP, GPP, respiration, and NEP during boreal forest succession // Glob. Chang. Biol. 2011. V. 17. P. 855–871. DOI: 10.1111/j.1365-2486.2010.02274.x.
- 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 TROPISIF global sun-induced fluorescence dataset from the Sentinel-5P TROPOMI mission // Earth. Syst. Sci. Data. 2021. V. 13. P. 5423–5440. DOI: 10.5194/essd-13-5423-2021.
- He L., Byrne B., Yin Y., Liu J., Frankenberg C. Remote-sensing derived trends in gross primary production explain increases in the CO₂ seasonal cycle amplitude // Global Biogeochemical Cycles. 2022. V. 36. № e2021GB007220. DOI: 10.1029/2021GB007220.
- Ji Y., Zeng S., Liu X., Xia J. Mutual inhibition effects of elevated CO₂ and climate change on global forest GPP // Environ. Res. 2024. V. 252. № 119145. DOI: 10.1016/j.envres.2024.119145.
- Köhler P., Frankenberg C., Magney T.S., Guanter L., Joiner J., Landgraf J. Global retrievals of solar-induced chlorophyll fluorescence with TROPOMI: First results and intersensor comparison to OCO-2 // Geophys. Res. Lett. 2018. V. 45. P. 10456–10463. DOI: 10.1029/2018GL079031.
- Launiainen S., Katul G.G., Leppä K., Kolari P., Aslan T., Grönholm T., Korhonen L., Mammarella I., Vesala T. Does growing atmospheric CO₂ explain increasing carbon sink in a boreal coniferous forest? // Glob. Chang. Biol. 2022. V. 28. P. 2910–2929. DOI: 10.1111/gcb.16117.
- Li X., Xiao J. TROPOMI observations allow for robust exploration of the relationship between solar-induced chlorophyll fluorescence and terrestrial gross primary production // Remote Sens. of Environ. 2022. V. 268. № 112748. DOI: 10.1016/j.rse.2021.112748.
- Liao Z., Zhou B., Zhu J., Jia H., Fei X. A critical review of methods, principles and progress for estimating the gross primary productivity of terrestrial ecosystems // Front. Environ. Sci. 2023. V. 11. № 1093095. DOI: 10.3389/fenvs.2023.1093095.

- Lin S., Huang X., Zheng Y., Zhang X., Yuan W. An Open Data Approach for Estimating Vegetation Gross Primary Production at Fine Spatial Resolution // Remote Sensing. 2022. V. 14(11). № 2651. DOI: 10.3390/rs14112651.
- Makarova M.V., Abakumov E.V., Shevchenko E.V., Paramonova N.N., Pakhomova N.V., Lyova N.A., Vetrova M.A., Foka S.C., Guzov Iu.N., Ivakhov V.M., Ionov D.V., Khoroshavin A.V., Kostsov V.S., Mikushev S.V., Mikhailov E.F., Pavlovsky A.A., Titov V.O. From carbon polygon to carbon farm: The potential and ways of developing the sequestration carbon industry in the Leningrad Region and St. Petersburg // Vestnik of Saint Petersburg University. Earth Sciences. 2023. V. 68(1). P. 82–102. DOI: 10.21638/spbu07.2023.105.
- Mamkin V., Varlagin A., Yaseneva I., Kurbatova J. Response of spruce forest ecosystem CO₂ fluxes to inter-annual climate anomalies in the Southern Taiga // Forests. 2022. V. 13. № 1019. DOI: 10.3390/f13071019.
- NOAA /ESRL [Electronic resource] Trends in Atmospheric Carbon Dioxide (CO₂) https://gml.noaa.gov/ccgg/trends/gl_trend.html (дата обращения 15.05.2024).
- OCO-2 Science Team/Michael Gunson, Annmarie Eldering. 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, Greenbelt, MD, USA, Goddard Earth Sciences Data and Information Services Center (GES DISC). 2020. <https://doi.org/10.5067/XO2LBBNPO010> (дата обращения 21.12.2023)
- Schacherl T. Evaluating Drought Impacts on Ecosystem Water Use Efficiency of Three Different Boreal Forest Sites // Master thesis, Swedish University of Agricultural Sciences. 2021. https://stud.epsilon.slu.se/17329/1/schacherl_t_211024.pdf
- Thoning K.W., Tans P.P., Komhyr W.D. Atmospheric carbon dioxide at Mauna Loa Observatory. 2. Analysis of the NOAA GMCC Data, 1974–1985 // J. Geophys. Res. 1989. V. 94. P. 8549–8565.
- Wang M., Zhang L. Synchronous Changes of GPP and Solar-Induced Chlorophyll Fluorescence in a Subtropical Evergreen Coniferous Forest // Plants. 2023. V. 12(11). № 2224. DOI: 10.3390/plants12112224.
- Wild B., Teubner I., Moesinger L., Zotta R-M., Forkel M., van der Schalie R., Sitch S., Dorigo W. VODCA2GPP – a new, global, long-term (1988–2020) gross primary production dataset from microwave remote sensing // Earth Syst. Sci. Data. 2022. V. 14. P. 1063–1085. DOI: 10.5194/essd-14-1063-2022.
- WMO Greenhouse Gas Bulletin No. 19. The State of Greenhouse Gases in the Atmosphere Based on Global Observations through 2022. 2023. <https://library.wmo.int/idurl/4/68532> (дата обращения 26.11.2023)
- Xiao J., Zhuang Q., Law B.E., Baldocchi D.D., Chen J., Richardson A.D. et al. Assessing net ecosystem carbon exchange of U.S. terrestrial ecosystems by integrating eddy covariance flux measurements and satellite observations // Agric. For Meteorol. 2011. V. 151. P. 60–69. DOI: 10.1016/j.agrformet.2010.09.002.

Gross Primary Production Estimation of the Leningrad Region Ecosystem Using OCO-2 Datasets

S. C. Foka¹, M. V. Makarova¹, E. V. Abakumov¹, D. V. Ionov¹

¹St. Petersburg State University, St. Petersburg, Russia

In order to implement measures to control climate-active gases and study the absorption potential of greenhouse gases in Russia began the creation of carbon test sites, each of which is characterized by a representative ecosystem on the territory of our country. One of the goals of the Ladoga carbon test site, planned for creation in 2024–2025 on the territory of the Leningrad Region, is to study the processes of carbon dioxide absorption by the Northwest Russian ecosystem. For this reason, it is necessary to estimate gross primary production (GPP) and understand of the processes influencing on it. GPP for the Leningrad Region territory in 2014–2022 was determined using solar-induced chlorophyll fluorescence (SIF) data measured by the OCO-2 satellite equipment. It was found that GPP has an annual cycle with maximum in June–July. Moreover, GPP trend for 2015–2021 was positive, $0.08 \pm 0.02 \text{ gCm}^{-2}\text{day}^{-1}\text{year}^{-1}$. The estimated values of net ecosystem exchange (NEE) of the Ladoga carbon test site were 0.1–2.3 $\text{ktCO}_2\text{year}^{-1}$. The obtained results can be used for independent assessments of the absorption potential on the Russian territory.

Keywords: southern taiga subzone, middle taiga subzone, solar-induced chlorophyll fluorescence, gross primary production, seasonal cycle, trend, net ecosystem exchange

REFERENCES

- Annual report: Provisional State of the Global Climate 2023, <https://wmo.int/files/provisional-state-of-global-climate-2023> (cited 26.02.2024)
- Bo Y., Li X., Liu K., Wang S., Zhang H., Gao X., Zhang X. Three decades of gross primary production (GPP) in China: variations, trends, attributions, and prediction inferred from multiple datasets and time series modeling // Remote Sens. 2022. V. 14. № 11:2564. DOI: 10.3390/rs14112564.
- Chen A., Mao J., Ricciuto D., Lu D., Xiao J., Li X., Thornton P.E., Knapp A.K. Seasonal changes in GPP/SIF ratios and their climatic determinants across the Northern Hemisphere // Glob. Chang. Biol. 2021. V. 27. P. 5186–5197. DOI: 10.1111/gcb.15775.

- Cho S., Kang M., Ichii K., Kim J., Lim J.H., Chun J.H., Park C.W., Kim H.S., Choi S.W., Lee S.H., Indrawati Y.M., Kim J. Evaluation of forest carbon uptake in South Korea using the national flux tower network, remote sensing, and data-driven technology // *Agric. For Meteorol.* 2021. V. 311. № 108653. DOI: 10.1016/j.agrformet.2021.108653.
- Cui Y., Xiao X., Zhang Y., Dong J., Qin Y., Doughty R.B., Zhang G., Wang J., Wu X., Qin Y., Zhou S., Joiner J., Moore B. Temporal consistency between gross primary production and solar-induced chlorophyll fluorescence in the ten most populous megacity areas over years // *Sci. Rep.* 2017. V. 7. № 14963. DOI: 10.1038/s41598-017-13783-5.
- Doughty R., Kurosu T.P., Parazoo N., Köhler P., Wang Y., Sun Y., Frankenberg C. Global GOSAT, OCO-2, and OCO-3 solar-induced chlorophyll fluorescence datasets // *Earth. Syst. Sci. Data.* 2022. V. 14. P. 1513–1529. DOI: 10.5194/essd-14-1513-2022.
- Duveiller G., Filippini F., Walther S., Köhler P., Frankenberg C., Guanter L., Cescatti A. A spatially downscaled sun-induced fluorescence global product for enhanced monitoring of vegetation productivity // *Earth. Syst. Sci. Data.* 2022. V. 12. P. 1101–1116. DOI: 10.5194/essd-12-1101-2020.
- Dyukarev E., Semenov S. Numerical Modeling of Biogeochemical Carbon Cycles in Swamp Ecosystems // *Izvestiya of Altai State University.* 2022. № 4 (126). P. 104–109. DOI: 10.14258/izvasu(2022)4-16. (In Russian).
- Foka S.C., Makarova M.V., Poberovsky A.V., Ionov D.V., Abakumov E.V. Analysis of mixing ratios of greenhouse carbon-containing gases at the atmospheric monitoring station of St. Petersburg State University // *Atmos. Ocean. Opt.* 2024. V. 37. P. 74–81. DOI: 10.1134/S1024856023700094.
- Goulden M.L., Mcmillan A.M.S., Winston G.C., Rocha A.V., Manies K.L., Harden J.W., Bond-Lamberty B.P. Patterns of NPP, GPP, respiration, and NEP during boreal forest succession // *Glob. Chang. Biol.* 2011. V. 17. P. 855–871. DOI: 10.1111/j.1365-2486.2010.02274.x.
- 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 TROPISIF global sun-induced fluorescence dataset from the Sentinel-5P TROPOMI mission // *Earth. Syst. Sci. Data.* 2021. V. 13. P. 5423–5440. DOI: 10.5194/essd-13-5423-2021.
- He L., Byrne B., Yin Y., Liu J., Frankenberg C. Remote-sensing derived trends in gross primary production explain increases in the CO₂ seasonal cycle amplitude // *Global Biogeochemical Cycles.* 2022. V. 36. № e2021GB007220. DOI: 10.1029/2021GB007220.
- Ji Y., Zeng S., Liu X., Xia J. Mutual inhibition effects of elevated CO₂ and climate change on global forest GPP // *Environ. Res.* 2024. V. 252. № 119145. DOI: 10.1016/j.envres.2024.119145.
- Köhler P., Frankenberg C., Magney T.S., Guanter L., Joiner J., Landgraf J. Global retrievals of solar-induced chlorophyll fluorescence with TROPOMI: First results and intersensor comparison to OCO-2 // *Geophys. Res. Lett.* 2018. V. 45. P. 10456–10463. DOI: 10.1029/2018GL079031.
- Lagutin A.A., Mordvin E.Yu., Volkov N.V. Estimates of gross primary production for the territory of South Western Siberia in 2014–2021 based on data from the OCO-2 and OCO-3 orbital carbon observatories // *Proceedings of the XXX International Symposium “Atmospheric and Ocean Optics, Atmospheric Physics”.* [Electronic resource]. Tomsk: Optika Atmosfery i Okeana, 2022. P. B-328–B-331. DOI: 10.56820/OAOPA.2022.39.85.001. (In Russian).
- Launiainen S., Katul G.G., Leppä K., Kolari P., Aslan T., Grönholm T., Korhonen L., Mammarella I., Vesala T. Does growing atmospheric CO₂ explain increasing carbon sink in a boreal coniferous forest? // *Glob. Chang. Biol.* 2022. V. 28. P. 2910–2929. DOI: 10.1111/gcb.16117.
- Li X., Xiao J. TROPOMI observations allow for robust exploration of the relationship between solar-induced chlorophyll fluorescence and terrestrial gross primary production // *Remote Sens. of Environ.* 2022. V. 268. № 112748. DOI: 10.1016/j.rse.2021.112748.
- Liao Z., Zhou B., Zhu J., Jia H., Fei X. A critical review of methods, principles and progress for estimating the gross primary productivity of terrestrial ecosystems // *Front. Environ. Sci.* 2023. V. 11 № 1093095. DOI: 10.3389/fenvs.2023.1093095.
- Lin S., Huang X., Zheng Y., Zhang X., Yuan W. An Open Data Approach for Estimating Vegetation Gross Primary Production at Fine Spatial Resolution // *Remote Sensing.* 2022. V. 14(11). № 2651. DOI: 10.3390/rs14112651.
- Makarova M.V., Abakumov E.V., Shevchenko E.V., Paramonova N.N., Pakhomova N.V., Lvova N.A., Vetrova M.A., Foka S.C., Guzun Iu.N., Ivakhov V.M., Ionov D.V., Khoroshavin A.V., Kostsov V.S., Mikushev S.V., Mikhailov E.F., Pavlovsky A.A., Titov V.O. From carbon polygon to carbon farm: The potential and ways of developing the sequestration carbon industry in the Leningrad Region and St. Petersburg // *Vestnik of Saint Petersburg University. Earth Sciences.* 2023. V. 68(1). P. 82–102. DOI: 10.21638/spbu07.2023.105.
- Mamkin V., Varlagin A., Yaseneva I., Kurbatova J. Response of spruce forest ecosystem CO₂ fluxes to inter-annual climate anomalies in the Southern Taiga // *Forests.* 2022. V. 13. № 1019. DOI: 10.3390/f13071019.
- NOAA /ESRL [Electronic resource] Trends in Atmospheric Carbon Dioxide (CO₂) https://gml.noaa.gov/ccgg/trends/gl_trend.html (дата обращения 15.05.2024)
- OCO-2 Science Team/Michael Gunson, Annmarie Eldering. 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, Greenbelt, MD, USA, Goddard Earth Sciences Data and Information Services Center (GES DISC). 2020. <https://doi.org/10.5067/XO2LBBNPO010> (cited 21.12.2023)
- Russian Federation’s Carbon measurement supersites <https://carbon-polygons.ru/> (cited 12.11.2024).
- Schacherl T. Evaluating Drought Impacts on Ecosystem Water Use Efficiency of Three Different Boreal Forest Sites // Master thesis, Swedish University of Agricultural Sciences. 2021. https://stud.epsilon.slu.se/17329/1/schacherl_t_211024.pdf.
- Thoning K.W., Tans P.P., Komhyr W.D. Atmospheric carbon dioxide at Mauna Loa Observatory. 2. Analysis of the NOAA GMCC Data, 1974–1985 // *J. Geophys. Res.* 1989. V. 94. P. 8549–8565.
- Wang M., Zhang L. Synchronous Changes of GPP and Solar-Induced Chlorophyll Fluorescence in a Subtropical Evergreen Coniferous Forest // *Plants.* 2023. V. 12(11). № 2224. DOI: 10.3390/plants12112224.

- Wild B., Teubner I., Moesinger L., Zotta R-M., Forkel M., van der Schalie R., Sitch S., Dorigo W.* VODCA2GPP – a new, global, long-term (1988–2020) gross primary production dataset from microwave remote sensing // *Earth Syst. Sci. Data*. 2022. V. 14. P. 1063–1085. DOI: 10.5194/essd-14-1063-2022.
- WMO Greenhouse Gas Bulletin No. 19. The State of Greenhouse Gases in the Atmosphere Based on Global Observations through 2022. 2023. <https://library.wmo.int/idurl/4/68532> (cited 26.11.2023)
- Xiao J., Zhuang Q., Law B.E., Baldocchi D.D., Chen J., Richardson A.D. et al.* Assessing net ecosystem carbon exchange of U.S. terrestrial ecosystems by integrating eddy covariance flux measurements and satellite observations // *Agric. For Meteorol.* 2011. V. 151. P. 60–69. DOI:10.1016/j.agrformet.2010.09.002.