

РАДИАЦИЯ И БИОСФЕРА

УДК 581.132, 528.8

Фотосинтетическая активность различных типов растительности юга Западной Сибири и ее взаимосвязь с параметрами окружающей среды по данным реанализа и спутниковых наблюдений

А.В. Скороходов[✉], Т.Б. Журавлёва*

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

Поступила в редакцию 04.09.2025;
после доработки 06.10.2025;
принята к печати 07.10.2025

Солнечно-индуцированная флуоресценция является показателем фотосинтетической активности растений, перспективным для мониторинга продуктивности экосистем в глобальном масштабе. Представлены оценки фотосинтетической активности основных фитоценозов юга Западной Сибири (луга, лиственные и светлохвойные леса, пахотные земли и болота) на основе спутниковых данных TROPOMI за 2018–2024 гг. С привлечением данных реанализа ERA5-Land и продуктов, полученных на основе измерений сенсорами MODIS и CERES, исследованы корреляционные связи солнечно-индуцированной флуоресценции с основными температурно-влажностными параметрами окружающей среды, вегетационными индексами и фотосинтетически активной радиацией, а также непосредственно между самими этими характеристиками (пространственное разрешение – 0,05°, временное разрешение – 1 мес.). Представленные результаты демонстрируют особенности этих взаимосвязей как для основных фитоценозов всего целевого региона, так и их широтную изменчивость для лугов и лиственных лесов.

Ключевые слова: солнечно-индуцированная флуоресценция, температурно-влажностные параметры, вегетационные индексы, фотосинтетически активная радиация, корреляционный анализ, TROPOMI, ERA5-Land, MODIS, CERES; solar-induced fluorescence, temperature-moisture parameters, vegetation index, photosynthetically active radiation, correlation analysis, TROPOMI, ERA5-Land, MODIS, CERES.

Введение

Фотосинтез имеет глобальное значение для биосферы Земли, поскольку обеспечивает образование необходимого для жизни кислорода и снижает концентрацию углекислого газа (CO₂) в атмосфере. На данный момент накоплен достаточно большой объем информации о пространственно-временной изменчивости концентрации CO₂ в атмосфере, однако в оценках баланса углерода до сих пор сохраняются значительные неопределенности [1–4]. Это связано прежде всего с отличиями в эффективности продукционных и деструкционных ветвей углеродного цикла, а также процессов депонирования и ресинтеза органических соединений в различных экосистемах (и даже внутри них), которые зависят от многих параметров окружающей среды.

Детальное изучение углеродного цикла конкретной экосистемы проводится *in situ* с использованием методов вихревой ковариации/турбулентных

пульсаций, градиентных или камерных [5–7], а также метода индукции флуоресценции хлорофилла [8]. С точки зрения глобального охвата поверхности Земли одним из основных «поставщиков» таких данных является сеть микрометеорологических станций FLUXNET. Она предоставляет временные ряды измерений потоков углерода, водяного пара и энергии между биосферой и атмосферой с различным временным разрешением [9]. На территории России мониторинг экосистемных потоков парниковых газов методом турбулентных пульсаций выполняется в рамках региональных сетей и станций, включенных в базу данных RuFlux [10].

Основной недостаток *in situ* измерений заключается в том, что получаемые оценки составляющих углеродного цикла репрезентативны только для участков сравнительно небольшой площади (радиусом не более 2000 м от точки расположения измерительного комплекса). В качестве эффективного способа получения информации об исследуемых процессах в региональном и глобальном масштабах в последние несколько лет используется подход,

* Алексей Викторович Скороходов (vazime@yandex.ru);
Татьяна Борисовна Журавлёва (ztb@iao.ru).

основанный на регистрации флуоресцентного излучения хлорофилла, индуцированного солнечным светом (Solar-Induced Fluorescence, SIF), средствами дистанционного зондирования из космоса [11–14]. SIF представляет собой собственное излучение, испускаемое молекулами растений в спектральном диапазоне 600–800 нм в течение нескольких наносекунд после поглощения солнечного света. Основные пики SIF вблизи 680 и 740 нм расположены рядом с линиями Фраунгофера (687 и 760 нм), что делает возможным выделение слабого вклада (~ 1–2%) в сигнал, который регистрируется спутниковыми инструментами [11].

В настоящее время SIF используют в основном для оценки валового первичного продукта экосистем (Gross Primary Production, GPP) в эмпирических данных и для развития сложных математических моделей фотосинтеза. Значительная неопределенность в оценках глобального показателя GPP, включая его среднегодовое значение и межгодовую изменчивость, все еще остается [2–4, 15]. В глобальном масштабе на длительных временных интервалах между SIF и GPP наблюдается практически линейная зависимость, однако на региональном уровне в различных экосистемах связь между этими характеристиками может значительно варьироваться под влиянием структуры растительного покрова, фотохимической эффективности и климатических факторов [13, 14, 16–18]. Данная проблема особенно актуальна для регионов со значительной природной неоднородностью и выраженной сезонностью, таких, например, как юг Западной Сибири. Территория этого региона характеризуется коротким, но интенсивным вегетационным периодом, резкими перепадами температуры и влажности, а также значительной изменчивостью соотношения прямой и рассеянной солнечной радиации в условиях континентального климата. Эти факторы формируют уникальную

модель динамики фотосинтеза, в которой связь GPP–SIF в зависимости от пространственно-временных масштабов может отличаться от таковой для тропических регионов и умеренных лесов Европы и Северной Америки, которые чаще всего являются объектами исследований [14, 17–20].

Цель настоящей работы – выявление ключевых параметров окружающей среды, оказывающих наибольшее влияние на SIF экосистем юга Западной Сибири, в вегетационном периоде (май–сентябрь) в 2018–2024 гг. по данным дистанционного зондирования Земли из космоса и реанализа, приведенных к единому пространственному (0,05°) и временному (1 мес.) разрешению.

Материалы и методы

Для выявления ключевых параметров окружающей среды использовались данные дистанционного зондирования с сенсора TROPOMI (Tropospheric Monitoring Instrument, спутник Sentinel-5P [21]), реанализ глобального климата ERA5-Land от ECMWF (Европейский центр среднесрочных прогнозов погоды) [22], а также продукты сенсоров MODIS (спутник Aqua) и CERES (спутники Aqua, NOAA-20 и Terra).

Карта растительности целевого региона (рис. 1), который включает в себя Алтайский край, Кемеровскую, Новосибирскую, Омскую и Томскую области, получена с помощью сервиса VEGA-Science Института космических исследований РАН [23]. Карта с исходным пространственным разрешением 250 м создана на основе безоблачных композитных изображений, полученных спектрорадиометром MODIS спутника Terra, и учитывает особенности фенологической динамики фитоценозов. Поскольку в рассматриваемый период времени доля площади, занимаемой каждым типом растительности, менялась

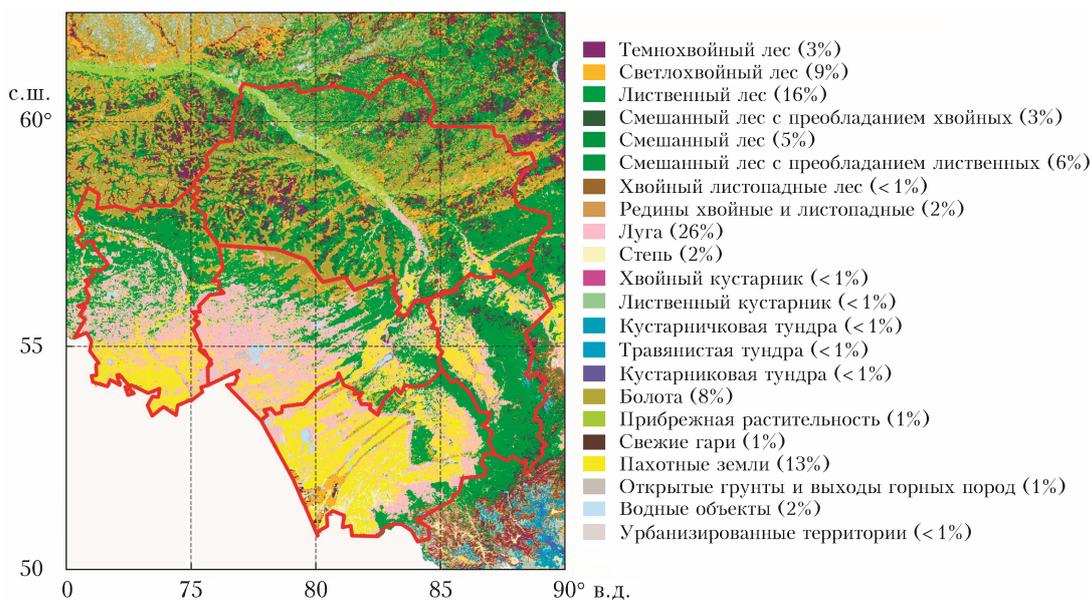


Рис. 1. Карта растительности целевого региона за 2024 г. по данным сервиса VEGA-Science [23] (см. цветные рисунки на сайте <http://iao.ru/ru/content/vol.39-2026/iss.03>)

несущественно (менее чем на 0,1% в целом по всем фитоценозам), в настоящей работе используется изображение за 2024 г. Представленный ниже анализ выполнен для наиболее распространенных типов растительности в регионе: лугов (26%), лиственных (16%) и светлохвойных (9%) лесов, пахотных земель (13%) и болот (8%).

Отметим, что выбор карты обусловлен более высоким пространственным разрешением и более детальной классификацией фитоценозов Российской Федерации по сравнению с традиционными продуктами ESA Land Cover и MODIS Land Cover [24]. При агрегации карты до более грубого пространственного разрешения эти особенности обеспечивают более высокую точность локализации экосистем за счет уменьшения количества ошибок, связанных с эффектом субпиксельной неоднородности.

В таблице представлены рассматриваемые в работе параметры растительности и окружающей среды, их условные обозначения (наиболее часто используемые в отечественной и зарубежной литературе), единицы измерения, источники данных и другие вспомогательные сведения. При выборе составляющих этого множества мы учитывали опыт других научных групп, исследующих связи SIF с метеорологическими условиями (температурно-влажностный режим почвы и атмосферы), характеристиками растительного покрова (вегетационные индексы, индекс листовой поверхности) и радиационным режимом (компоненты фотосинтетически активной радиации) [19, 25].

Основная часть информации получена на основе данных сенсора MODIS, обеспечивающего ежедневное глобальное покрытие с эталонной точностью

Параметры растительности и окружающей среды, рассматриваемые в работе

Параметр (обозначение)	Единицы измерения	Название продукта (источник)	Пространственное (временное) разрешение	Оценки точности в единицах измерения
Солнечно-индуцированная флуоресценция (Solar-Induced Fluorescence, SIF)	мВт/ (м ² ·нм ср)	TROPOSIF (сенсор TROPOMI Sentinel-5P)	3,5 × 5,5 км (1 день)	RE (окно 735 нм) = 0,4 над Сахарой RE (окно 743 нм) = 0,5 над Сахарой
Дефицит давления водяного пара (Vapor Pressure Deficit, VPD)	Па	ERA5-Land (реанализ ECMWF)	0,1° (1 мес.)	MB = -200–400 (SYNOP) при RMSE = 0,5–1,0 для Западной Сибири
Температура верхнего слоя почвы (Skin Temperature, SKT)	К			MB = ± 1 (FLUXNET) при RMSE = 2–4 для поверхности суши
Температура воздуха на уровне 2 м (T2M)	К			MB = ± 1 (SYNOP) при RMSE = 0–1 для Западной Сибири
Суммарное количество осадков (Total Precipitation, TP)	мм			MB = -30–50 (SYNOP) при RMSE = 30–50 для Западной Сибири
Температура земной поверхности (Land Surface Temperature, LST)	К	MYD11C3 (сенсор MODIS Aqua)	0,05° (1 мес.)	MB = ± 1 (SYNOP) при RMSE = 2,65 для поверхности суши
Нормализованный относительный индекс растительности (Normalized Difference Vegetation Index, NDVI)	Безразмерная величина	MYD13A3 (сенсор MODIS Aqua)	1 км (1 мес.)	MB = ± 0,07 (FLUXNET) при RMSE = 0,05–0,1 для Западной Сибири
Усовершенствованный вегетационный индекс (Enhanced Vegetation Index, EVI)	Безразмерная величина			MB = ± 0,03 (FLUXNET) при RMSE = 0,07–0,1 для Западной Сибири
Индекс листовой поверхности (Leaf Area Index, LAI)	м ² /м ²	MYD15A2HGF (сенсор MODIS Aqua)	0,5 км (8 дней)	MAE = 0,1–2,0 (GBOV) при RMSE = 0,95 для Западной Сибири
Доля поглощенной фотосинтетически активной радиации (Fraction of Photosynthetically Active Radiation, FPAR)	%			MAE = 0,2–0,3 (GBOV) при RMSE = 0,18 для Западной Сибири
Фотосинтетически активная радиация: диффузная (PARDif) и прямая (PARDir) составляющие	Вт/м ²	CER_SYN1deg (сенсоры проекта CERES на спутниках Aqua, NOAA20 и Terra)	1° (1 мес.)	MB = 1,5 (SURFRAD) при STD = 5,2 для поверхности суши
Влажность почвы (Soil Moisture, SM)	%	C3S (активные и пассивные сенсоры)	0,25° (1 мес.)	MB = ± 2 (ISMN) при RMSE = 4–7 для умеренных широт

Примечание. Оценки точности восстановления: погрешность извлечения данных (Retrieval Error, RE), среднее смещение (Mean Bias, MB), среднеквадратическая ошибка (Root Mean Square Error, RMSE), средняя абсолютная ошибка (Mean Absolute Error, MAE) и стандартное отклонение (Standard Deviation, STD).

для пассивного спутникового зондирования с низким пространственным разрешением. Другим важным аргументом в пользу выбора продукции MODIS является близкое время пересечения экватора на нисходящем витке спутниками Aqua и Sentinel-5P, что обеспечивает более корректную интерпретацию полученных результатов. Выбор данных реанализа глобального климата ERA5-Land обусловлен пространственным разрешением — наилучшим из представленных в открытом доступе реанализов [26] — и временным шагом в один час, что упрощает агрегацию данных за определенное время суток.

В последнем столбце таблицы приведены оценки качества восстановления этих характеристик [12, 22, 27–33], а также регионы, для которых они получены (поверхность суши, умеренные широты, Западная Сибирь, Сахара). Кроме того, указаны базы данных, с которыми сопоставлялись результаты восстановления параметров растительности и окружающей среды на основе спутникового зондирования: наблюдения сети наземных метеостанций (Surface Synoptic Observations, SYNOP), измерения сети потоковых башен (FLUXNET), валидационные наборы (Copernicus Ground-Based Observation for Validation, GBOV), наблюдения сети станций за радиационным балансом Земли (Surface Radiation Budget Network, SURFRAD), наземные измерения влажности почвы (International Soil Moisture Network, ISMN) [33–36].

Поскольку SIF является исключительно результатом фотосинтеза, для дальнейшего рассмотрения выбраны данные только для активного вегетационного периода в целевом регионе: май–сентябрь [37]. Несмотря на то что в отдельные годы период вегетации на юге Западной Сибири может начинаться в апреле, а заканчиваться в октябре, на основе предварительного анализа было установлено, что суммарные значения SIF в эти месяцы крайне низки и на этом этапе исследования их можно не рассматривать. Поскольку в стандартном продукте TROPOMI содержится дневная оценка этого параметра [11, 21], данные реанализа ERA5-Land выбирались только за промежуток времени, соответствующий световому дню в точке наблюдения.

Как следует из таблицы, рассматриваемые параметры растительности и окружающей среды восстанавливаются с разными пространственным и временным разрешениями, что создает риск некорректной оценки влияния различных факторов на динамику фотосинтетической активности фитоценозов в регионе. Поэтому на первом этапе исследования все данные были приведены к единому пространственно-временному разрешению. Для соблюдения баланса между детализированностью карты растительности (см. рис. 1), данными спутникового зондирования и реанализа с учетом опыта других исследований в этой области (см., например, [14]) шаг по пространству был выбран равным $0,05^\circ$. Исходя из цели работы, рассматривался временной интервал в один месяц.

Карта растительности была приведена к заданному масштабу методом ближайшего соседа, кото-

рый выделяет преобладающий фитоценоз в каждой ячейке сетки [38]. Затем были получены среднемесячные значения SIF с пространственным разрешением $0,05^\circ$, поскольку такой стандартный продукт TROPOMI отсутствует. Отметим, что в нашей работе использовались результаты восстановления SIF только в окне 735 нм из-за меньших погрешностей восстановления сигнала вследствие большего числа спектральных точек в окне аппроксимации [21]. В статье [21] также указано, что при доле облачности меньше 0,2 для SIF (735 нм) и 0,8 для SIF (743 нм) эти значения хорошо согласуются для таких экосистем, как пашни, хвойные и широколиственные леса. На юге Западной Сибири в рассматриваемый период сезонная доля облачности для пяти изучаемых экосистем варьируется от 0,2 (пашни) до 0,25 (болота). С учетом этого в настоящей работе выбраны данные измерений SIF в канале 735 нм.

Информация с сенсора MODIS (LST, EVI, NDVI, LAI, fPAR), данные реанализа ERA5-Land (VPD, ST, TP, T2M), проекта CERES (PARDif и PARDir) и сведения о влажности почвы SM (Copernicus Climate Change Service, C3S) также агрегировались на сетку $0,05^\circ$. Далее выполнялся расчет среднемесячных значений (\bullet) характеристик из таблицы для основных типов растительности по всему целевому региону. Для оценки сезонных изменений этих параметров формировались соответствующие временные ряды за весь период наблюдения. Для каждой пары характеристик X и Y из таблицы вычислялись коэффициенты корреляции Пирсона $r(\langle X \rangle, \langle Y \rangle)$ и уровни значимости. На основе полученных данных строились тепловые карты для отдельных типов растительности, с помощью которых выявлялись ключевые факторы их фотосинтетической активности, а также другие взаимосвязи.

На заключительном этапе анализировались широтные зависимости между SIF и другими исследуемыми характеристиками из таблицы для лиственных лесов и лугов как наиболее распространенных фитоценозов данного региона. Для этого юг Западной Сибири был разбит на зоны с шагом по широте в 1° в диапазоне 50 – 60° с.ш. Интервал 50 – 52° с.ш. был объединен в одну область из-за малого количества точек в каждой из зон 50 – 51° и 51 – 52° . Территории севернее 60° с.ш. были исключены из рассмотрения вследствие низкой доли покрытия их луговой растительностью. По аналогии со статистической обработкой данных для региона в целом для каждой i -й зоны ($i = 50$ – 52 , 52 – 53 , ..., 59 – 60) были вычислены среднемесячные значения (\bullet) _{i} характеристик из таблицы, коэффициенты корреляции Пирсона $r_i(\langle \text{SIF} \rangle_i, \langle Y \rangle_i)$ и уровни значимости. На основе данных относительно широтной изменчивости $r_i(\langle \text{SIF} \rangle_i, \langle Y \rangle_i)$ выполнен анализ влияния параметров окружающей среды на фотосинтетическую активность лиственных лесов и лугов. Согласно полученным оценкам значения коэффициента корреляции как для региона в целом, так и участков протяженностью 1° по широте, удовлетворяющие

условию $|\tau(\langle X \rangle, \langle Y \rangle)| > 0,33$, являются статистически значимыми на уровне 95% согласно критерию Стьюдента.

Результаты и обсуждение

Корреляция SIF и параметров растительности и окружающей среды

На рис. 2, а приведена временная изменчивость $\langle SIF \rangle$ для наиболее распространенных типов растительности юга Западной Сибири. Из этого графика следует, что самой высокой фотосинтетической активностью обладают лиственные леса и луга, далее по убыванию идут пахотные земли, светлохвойные леса и болота. Наибольшей изменчивостью значений $\langle SIF \rangle$ в течение вегетационного периода характеризуются пашни, что в основном связано с влиянием антропогенных факторов (временем посадки/уборки, выбором возделываемых культур, вносимыми удобрениями и т.д.), а также высокой чувствительностью к погодным условиям (засухам/переувлажнению, заморозкам, неравномерности осадков) [39]. Самыми стабильными с точки зрения временной изменчивости за рассматриваемый промежуток времени являются болота благодаря минимальному антропогенному воздействию и естественным механизмам устойчивости, обусловленным

высокой степенью биоразнообразия и сглаживанием колебаний гидрологического режима [40]. Отметим, что пик фотосинтеза естественных фитоценозов приходится на июнь, а для пахотных земель – на июль.

На рис. 2, б представлены значения коэффициентов корреляции между $\langle SIF \rangle$ и другими среднемесячными параметрами из таблицы. Из приведенных результатов следует, что в целом наиболее тесная связь наблюдается между $\langle SIF \rangle$ и биофизическими индикаторами растительности (LAI, EVI и fPAR). Далее по убыванию следуют коэффициенты корреляции $\langle SIF \rangle$ с характеристиками температурного режима почвы и атмосферы (SKT, LST и T2M), радиационными параметрами (PARDir и PARdif) и влажностью почвы и воздуха (SM, VPD, TP).

Сильная связь между среднемесячными значениями SIF и LAI ($r(\langle SIF \rangle, \langle LAI \rangle) > 0,9$) является основополагающей: увеличение суммарной площади листьев на единицу площади почвы служит показателем фотосинтетической активности растений. Однако следует иметь в виду, что эта связь является нелинейной из-за эффекта взаимного затенения листьев [41]. Выявленная корреляция между $\langle SIF \rangle$ и $\langle EVI \rangle$ также достаточно очевидна: для всех фитоценозов (кроме болот) $r(\langle SIF \rangle, \langle EVI \rangle) > 0,8$, поскольку густая здоровая зеленая растительность активно флуоресцирует. (На рис. 2, б не приведены

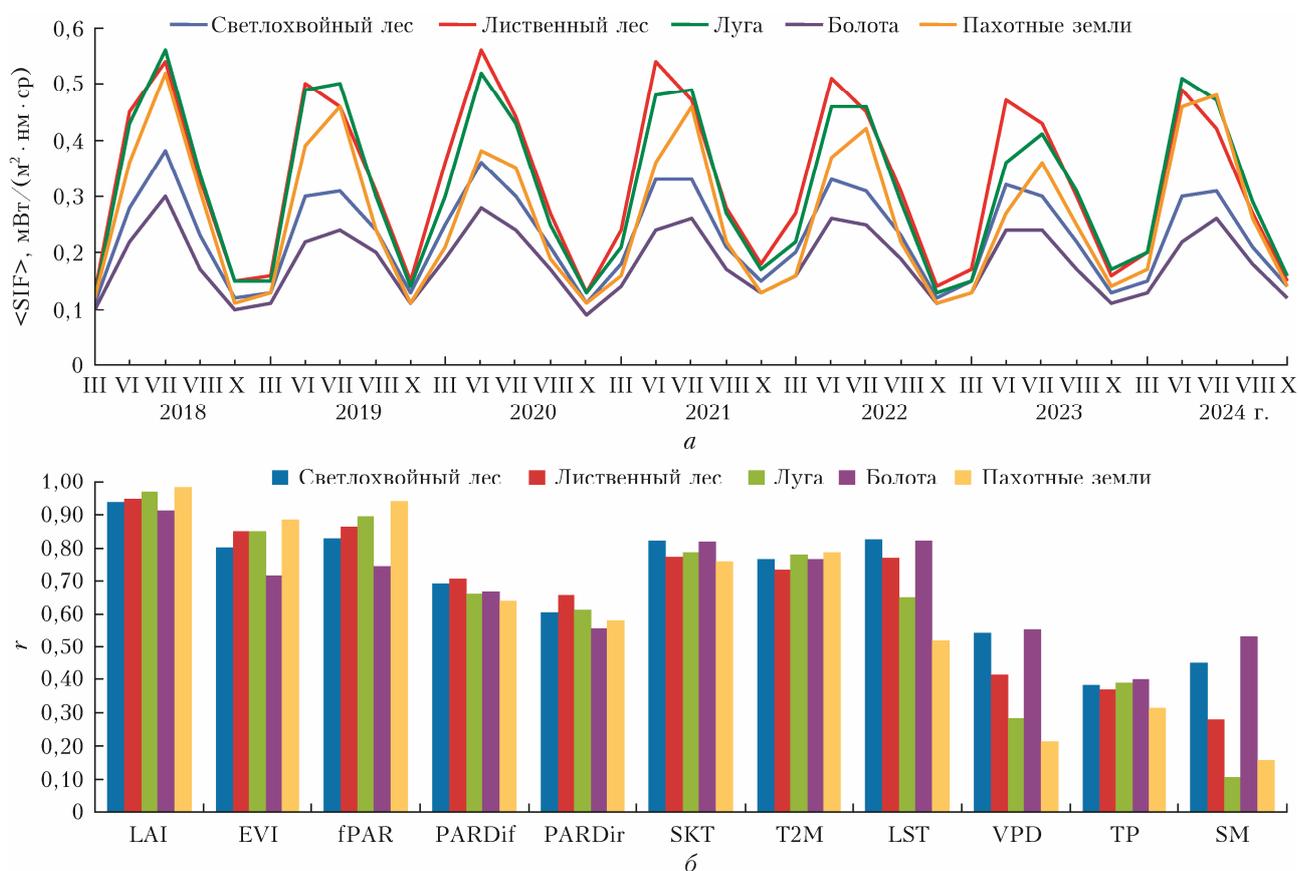


Рис. 2. Сезонная изменчивость солнечно-индуцированной флуоресценции у различных типов растительности целевого региона (а) и ее корреляция с другими характеристиками фитоценозов и параметрами окружающей среды (б)

значения $r(\langle \text{SIF} \rangle, \langle \text{NDVI} \rangle)$ по причине того, что, по сравнению с NDVI, индекс EVI корректирует и улучшает оценку характеристик растительности за счет учета атмосферных эффектов и почвенного фона, а также ввиду сходной изменчивости с $r(\langle \text{SIF} \rangle, \langle \text{EVI} \rangle)$ в заданных условиях.)

Учитывая, что количество доступной для фотосинтеза энергии напрямую зависит от количества поглощенной радиации, предсказуемы также высокие значения коэффициентов корреляции $r(\langle \text{SIF} \rangle, \langle \text{fPAR} \rangle)$, которые находятся в интервале $0,75 \div 0,9$. Кроме этого, имеет место неравенство $r(\langle \text{SIF} \rangle, \langle \text{PARDir} \rangle) > r(\langle \text{SIF} \rangle, \langle \text{PARDif} \rangle)$, поскольку площадь листовой поверхности, участвующей в генерации флуоресценции, при освещении рассеянным светом увеличивается, минимизируя эффекты взаимного затенения.

Особенностью растительного покрова юга Западной Сибири является то, что среднемесячные характеристики температурного режима более тесно связаны с фотосинтетической активностью растений, чем влажностные параметры даже для болот: если коэффициенты корреляции между $\langle \text{SIF} \rangle$ и $\{\langle \text{SKT} \rangle, \langle \text{LST} \rangle, \langle \text{T2M} \rangle\} > 0,6$, то уровень корреляции $\langle \text{SIF} \rangle$ и $\{\langle \text{VPD} \rangle, \langle \text{TP} \rangle, \langle \text{SM} \rangle\}$ не достигает 0,5, причем для открытых площадей (луга и пахотные земли) связь $\langle \text{SIF} \rangle$ с $\langle \text{VPD} \rangle$ и $\langle \text{SM} \rangle$ находится на уровне или ниже статистической значимости 95% ($r < 0,3$) (рис. 2, б).

Достаточно высокий уровень корреляции между $\langle \text{SIF} \rangle$ и температурой подтверждается результатами, полученными другими авторами: в частности, в вегетационный период ~80% пространственной изменчивости фотосинтеза в северных лесах высоких широт определяется именно температурным режимом [42]. Относительно характеристик влажностного режима отметим, что их влияние на фотосинтетическую активность растений в других географических зонах (например, в тропиках [19]) может стать более значимым.

Взаимная корреляция параметров растительности и окружающей среды

На рис. 3 приведены тепловые карты корреляций между рассматриваемыми характеристиками (см. таблицу). Прежде всего, отметим высокую взаимную корреляцию характеристик *внутри* групп параметров растительности (EVI, LAI, fPAR) и температурного режима почвы и атмосферы (SKT, LST, T2M): коэффициент корреляции r для всех пяти биоценозов изменяется в диапазоне $\sim 0,75 \div 0,95$.

Характеристики влажностного режима (VPD, TP, SM) связаны между собой более сложными зависимостями [43–46]. Так, взаимосвязь между общим количеством осадков TP и дефицитом водяного пара VPD описывается умеренно отрицательной корреляцией с наибольшим по абсолютной величине коэффициентом r для пахотных земель

($r(\langle \text{TP} \rangle, \langle \text{VPD} \rangle) = -0,6$) и наименьшим – для светлохвойных лесов ($r(\langle \text{TP} \rangle, \langle \text{VPD} \rangle) = -0,37$).

Соотношение между влажностью почвы и дефицитом давления водяного пара, отражающим нехватку влаги в воздухе, обусловлено комплексным взаимодействием гидрогеологических факторов (уровень грунтовых вод и почвенной влажности), метеорологических условий (температура, влажность воздуха, эвапотранспирация) и биологических процессов (транспирация растений). Следствием влияния совокупности этих условий является положительный коэффициент корреляции для болотных систем ($r(\langle \text{SM} \rangle, \langle \text{VPD} \rangle) = 0,41$) и отрицательный – для лугов ($r(\langle \text{SM} \rangle, \langle \text{VPD} \rangle) = -0,53$), уменьшающийся на пахотных землях ($r(\langle \text{SM} \rangle, \langle \text{VPD} \rangle) = -0,76$). Различие гидрологических режимов лугов и болот проявляется также в связи между влажностью почвы и количеством осадков: в отличие от лугов, для которых имеет место умеренно положительная корреляция ($r(\langle \text{SM} \rangle, \langle \text{TP} \rangle) = 0,6 \div 0,7$), на болотах она уже не является статистически значимой ($r(\langle \text{SM} \rangle, \langle \text{TP} \rangle) = 0,17$).

Рассмотрим связи *между принадлежащими различным группам* характеристиками растительного покрова и окружающей среды на юге Западной Сибири. Для лесных массивов и болот наиболее сильные корреляционные связи наблюдаются между биофизическими индикаторами фитоценоза (LAI, EVI, fPAR) и характеристиками температурного режима (SKT, T2M, LST) ($r \sim 0,8–0,9$). Характеристики растительного полога лугов и пахотных земель также находятся в существенной зависимости от температуры воздуха и верхнего слоя почвы, но корреляция с температурой поверхности LST уменьшается: $r(\langle \text{LAI} \rangle, \langle \text{LST} \rangle) \sim 0,45–0,6$. Предположительно, этот эффект обусловлен значительным вкладом почвы в формирование температуры полога указанных фитоценозов [47], а также антропогенным воздействием, когда, например, из-за сенокосов или уборки урожая связи между рассматриваемыми характеристиками нарушаются.

Анализ коэффициентов корреляции выявил умеренную связь между индексом листовой поверхности и радиационными характеристиками в лесных массивах ($r(\langle \text{LAI} \rangle, \langle \text{PARDir} \rangle) \approx r(\langle \text{LAI} \rangle, \langle \text{PARDif} \rangle) = 0,5–0,6$). На лугах, пахотных землях и болотах эта связь слабее ($r \sim 0,4–0,5$).

Взаимосвязь между влажностными характеристиками и остальными группами параметров растительности и окружающей среды практически отсутствует: корреляция является либо слабой/слабо умеренной ($r \sim 0,3–0,4$), либо статистически незначимой. Отметим только высокие значения $r(\langle \text{VPD} \rangle, \langle \text{PARDir} \rangle) \approx 0,7$ для всех рассматриваемых фитоценозов (активное испарение в безоблачную погоду), а также $r(\langle \text{SM} \rangle, \langle \text{PARDir} \rangle) \approx 0,6$ и $r(\langle \text{SM} \rangle, \langle \text{PARDif} \rangle) = 0,7$ в лесах и болотах, что обусловлено смягчением испарения за счет поглощения прямого солнечного излучения пологом и наличием грунтовых вод (избыточной увлажненностью) соответственно.

Таким образом, найденные взаимосвязи между характеристиками растительности и параметрами окружающей среды объяснимы и хорошо согласуются между собой, но для их более надежной интерпретации требуется дополнительная информация.

Широтная зависимость средне-месячных значений SIF и коэффициентов их корреляции с параметрами растительности и окружающей среды

На рис. 4 показана изменчивость усредненных за весь вегетационный период значений SIF и коэффициентов их корреляции с другими параметрами растительности и окружающей среды для лист-

венных лесов и лугов в зависимости от широты местности. Фотосинтетическая активность указанных фитоценозов ожидаемо снижается при переходе от низких широт к высоким (рис. 4, а).

Из рис. 4, б следует, что с продвижением к северу связь температурных факторов с солнечно-индуцированной флуоресценцией в лиственных лесах и лугах усиливается. В низких широтах фотосинтетическая активность луговой растительности в большей степени определяется температурой воздуха T2M и верхнего слоя почвы SKT ($r \sim 0,7$) и в меньшей степени – температурой поверхности LST ($r \sim 0,5$), тогда как в высоких широтах их влияние на фотосинтез выравнивается ($r \sim 0,8$).

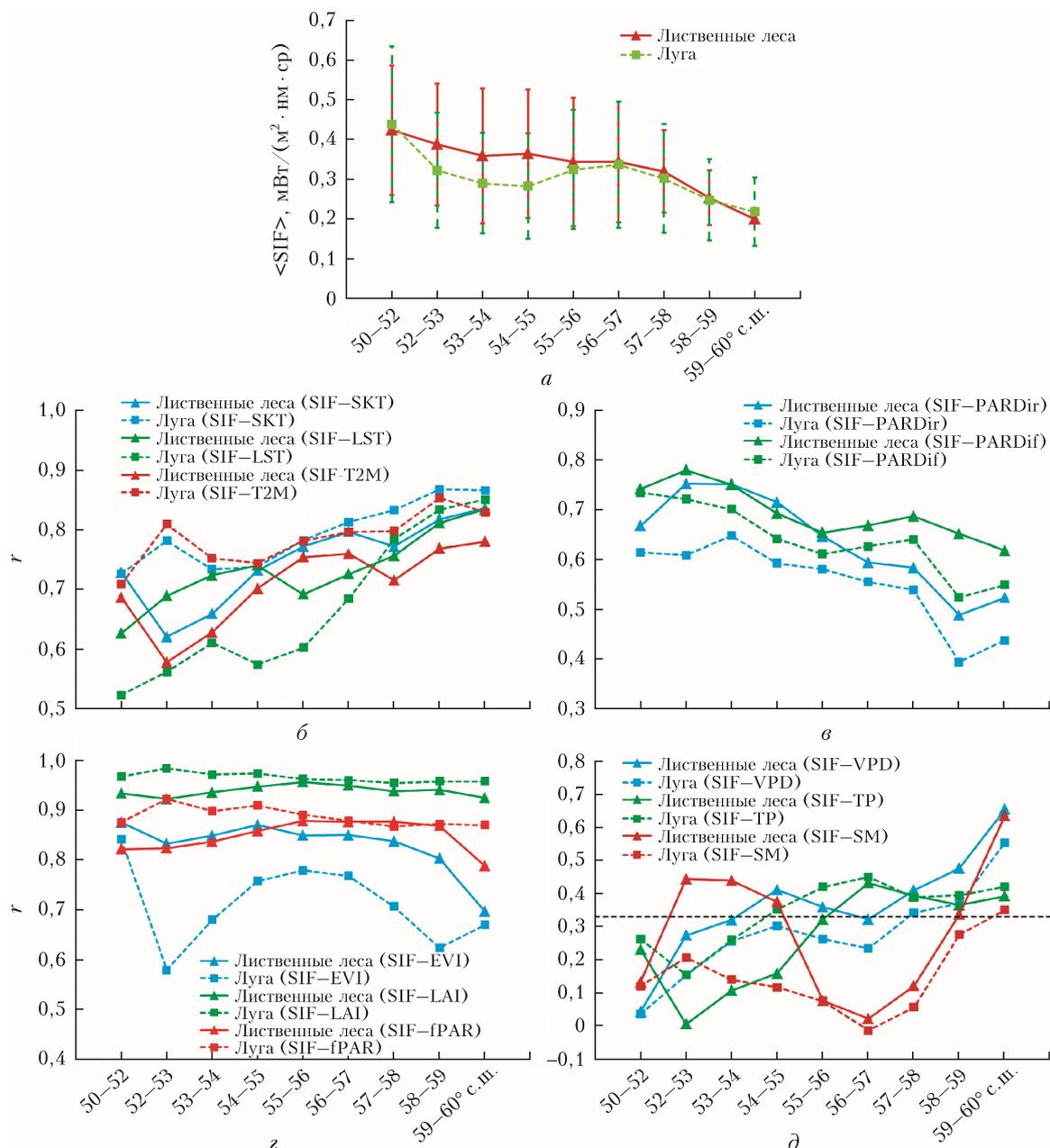


Рис. 4. Широтный ход: средних значений солнечно-индуцированной флуоресценции (а); коэффициентов ее корреляции с температурными (б), радиационными (в) и влажностными (д) параметрами окружающей среды, а также биофизическими индикаторами растительности (з)

Зависимость $\langle SIF \rangle$ от фотосинтетически активной радиации уменьшается с увеличением широты, причем для обоих рассматриваемых типов растительности связь $\langle SIF \rangle$ с $\langle PAR_{dif} \rangle$ остается более сильной по сравнению с $\langle PAR_{dir} \rangle$ во всем целевом регионе (рис. 4, в). С точки зрения радиационного воздействия изменчивость флуоресценции находится под влиянием противоположных по своему воздействию факторов: в северных регионах увеличивается продолжительность светового дня, возрастает доля диффузного излучения в составе суммарной радиации, но имеет место более низкая высота солнца. Последнее обстоятельство является, по-видимому, определяющим для формирования корреляционных связей между SIF и фотосинтетически активной радиацией. Зависимости $\langle SIF \rangle$ от $\langle fPAR \rangle$ не имеют ярко выраженного широтного хода при стабильно высоких значениях коэффициентов корреляции r (рис. 4, з).

На рис. 4, з представлены широтные изменчивости $r_i(\langle SIF \rangle_i, \langle LAI \rangle_i)$ и $r_i(\langle SIF \rangle_i, \langle EVI \rangle_i)$. Как и корреляции между $\langle SIF \rangle$ и $\langle fPAR \rangle$, значения $r_i(\langle SIF \rangle_i, \langle LAI \rangle_i)$ слабо изменяются с широтой ($r \sim 0,95$) для рассматриваемых биоценозов в отличие от $r_i(\langle SIF \rangle_i, \langle EVI \rangle_i)$.

Если связь $\langle SIF \rangle$ с $\langle EVI \rangle$ для лиственных лесов ослабевает при движении на север, особенно при переходе из зоны 58–59° с.ш. в 59–60° с.ш. (из-за меньшей густоты древостоя) [48], то для луговой растительности зависимость от широты гораздо более сложная. Высокие значения этого параметра в зоне 50–52° с.ш. предположительно связаны с тем, что основу фитоценоза здесь составляет высокопродуктивная растительность, произрастающая на черноземах, минимально затронутых человеческой деятельностью [49, 50]. Ее хорошему увлажнению способствует близость предгорий Алтая, где берут начало множество рек, например Чарыш и Ануй. Резкий спад $r(\langle SIF \rangle, \langle EVI \rangle)$ в зоне 52–53° с.ш., вероятнее всего, связан с влиянием антропогенного фактора (луга на месте бывших пашен, сенокосы), а также климатическими стрессами, вызванными приходящими из казахских степей суховеями.

При дальнейшем движении на север основным фитоценозом становятся слабо затронутые человеческой деятельностью естественные луга, большая часть которых расположена в Новосибирской области. Здесь хоть и преобладают разнотравно-злаковые остепененные луга в комплексе с солонцово-солончаковыми, но уже сказывается близость болот, т.е. почва становится более увлажненной и устойчивой к стрессовым ситуациям. Поэтому в зонах 54–57° с.ш. связь между $\langle SIF \rangle$ и $\langle EVI \rangle$ восстанавливается. В более высоких широтах значения $r(\langle SIF \rangle, \langle EVI \rangle)$ снова уменьшаются, поскольку основу луговой экосистемы здесь уже составляют пойменные луга, состоящие из малопродуктивных видов (злаковых и осоковых), чей рост ограничен коротким вегетационным периодом и избыточным увлажнением почв.

При анализе широтной изменчивости корреляции $\langle SIF \rangle$ и характеристик влажностного режима

атмосферы и почвы следует иметь в виду, что статистически значимая корреляция $\langle SIF \rangle$ с $\langle VPD \rangle$ и $\langle TP \rangle$ наблюдается только выше ~ 54° с.ш. (рис. 4, д).

Заключение

В настоящей работе представлены результаты исследования среднемесячной изменчивости солнечно-индуцированной флуоресценции основных типов растительности юга Западной Сибири (луга, лиственные и светлохвойные леса, пахотные земли и болота). Данные получены с помощью дистанционного зондирования сенсором TROPOMI за май–сентябрь 2018–2024 гг. и приведены к пространственному разрешению 0,05°. В рассматриваемый период наибольшая фотосинтетическая активность в пределах всего региона отмечена у таких биоценозов, как луга и лиственные леса, а наименьшая характерна для болот: максимальные значения $\langle SIF \rangle$ в рассматриваемый период составили ~ 0,45–0,55 и ~ 0,25–0,3 мВт/(м²·нм·ср) соответственно. Показано, что для лугов и лиственных лесов, присутствующих на всей территории региона, величина $\langle SIF \rangle$ уменьшается по мере продвижения на север от ~ 0,45 до ~ 0,2 мВт/(м²·нм·ср).

Для выявления связи SIF с параметрами растительности и окружающей среды были использованы данные спектрорадиометра MODIS и реанализа ERA5-Land, приведенные к тому же пространственно-временному разрешению. Анализ показал, что максимальные значения коэффициента корреляции Пирсона между значениями $\langle SIF \rangle$ и рассматриваемыми параметрами имеют место для группы (EVI, LAI и fPAR), связанной со структурой полога ($r \sim 0,8–0,95$) и далее (по убыванию) с параметрами температурного режима ($r \sim 0,8$) и характеристиками фотосинтетической радиации ($r \sim 0,6–0,7$). Наиболее слабой по сравнению со всеми остальными является взаимосвязь SIF с параметрами влажностного режима (VPD, SM, TP): если для светлохвойного леса и болот коэффициент корреляции изменялся в диапазоне 0,4–0,5, то для остальных типов растительности он был сравним или ниже уровня статистической значимости 95%.

Отметим, что проведенные расчеты позволили лишь в первом приближении определить наиболее значимые характеристики растительности и параметры окружающей среды для формирования значений $\langle SIF \rangle$. Для более точных оценок следует использовать более сложные статистические методы, такие как регрессионный анализ и метод главных компонент (см., например, [19]). Кроме того, требуются дополнительные исследования для выявления взаимосвязи между характеристиками растительности и параметрами окружающей среды рассматриваемых биоценозов с учетом климатических условий региона.

Финансирование. Работа выполнена в рамках госзадания ИОА СО РАН FWRU-2026-0005.

Список литературы

1. IPCC: Summary for policymakers // Climate Change 2021: The Physical Science Basis. Contribution of Working Group I to the Sixth Assessment Report of the Intergovernmental Panel on Climate Change. Cambridge: Cambridge University Press, 2021. P. 1–41.
2. Фёдоров Б.Г. Выбросы углекислого газа: углеродный баланс России // Проблемы прогнозирования. 2014. № 1. С. 63–77.
3. Мониторинг потоков парниковых газов в природных экосистемах // под ред. Д.Г. Замолдчикова, Д.В. Карелина, М.Л. Гитарского, В.Г. Блинова. Саратов: Амрита, 2017. 280 с.
4. Оценка потоков парниковых газов в экосистемах регионов Российской Федерации // отв. ред. А.А. Романовская. М.: ИГКЭ, Принт, 2023. 343 с.
5. Глаголев М.В. К методу «обратной задачи» для определения поверхностной плотности потока газа из почвы // Динамика окружающей среды и глобальные изменения климата. 2010. Т. 1, № 1. С. 17–36.
6. Nicolini G., Fratini G., Avilov V., Kurbatova J.A., Vasenev I., Valentini R. Performance of eddy-covariance measurements in fetch-limited applications // Theor. Appl. Climatol. 2015. V. 127. P. 829–840. DOI: 10.1007/s00704-015-1673-x.
7. Бурба Г.Г., Курбатова Ю.А., Куричева О.А., Авиллов В.К., Мамкин В.В. Метод турбулентных пульсаций: Краткое практическое руководство. М.: ИПЭЭ им. А.Н. Северцова РАН, 2016. 223 с.
8. Корнеев Д.Ю. Информационные возможности метода индукции флуоресценции хлорофилла. Киев: Альтерпрес, 2002. 188 с.
9. Baldocchi D.D., Falge E., Gu L., Olson R., Hollinger D.Y., Running S.W., Anthoni P., Bernhofer Ch., Davis K.J., Evans R., Fuentes J., Goldstein A., Katul G., Law B.E., Lee X., Malhi Y., Meyers T.P., Munger J.W., Oechel W.C., Paw U.K.T., Pilegaard K., Schmid H.P., Valentini R., Verma S., Vesala T., Wilson K.B., Wofsy S.C. FLUXNET: A new tool to study the temporal and spatial variability of ecosystem-scale carbon dioxide, water vapor, and energy flux densities // Bull. Am. Meteorol. Soc. 2001. V. 82. P. 2415–2434. DOI: 10.1175/1520-0477(2001)082<2415:FANTTS>2.3.CO;2.
10. Куричева О.А., Авиллов В.К., Варлагин А.В., Гитарский М.Л., Дмитриченко А.А., Дюкарев Е.А., Загорова С.В., Замолдчиков Д.Г., Зырянов В.И., Карелин Д.В., Карсанов С.В., Курганова И.Н., Лашина Е.Д., Максимов А.П., Максимов Т.Х., Мамкин В.В., Марунин А.С., Мигловец М.Н., Михайлов О.А., Панов А.В., Прокушкин А.С., Сиденко Н.В., Шилкин А.В., Курбатова Ю.А. Мониторинг экосистемных потоков парниковых газов на территории России: сеть RuFlux // Изв. РАН. Сер. Географическая. 2023. Т. 87, № 4. С. 512–535. DOI: 10.31857/S2587556623040052.
11. Frankenberg C., Berry J. Solar-induced chlorophyll fluorescence: Origins, relation to photosynthesis and retrieval // Comp. Remote Sens. 2018. V. 3. P. 143–162. DOI: 10.1016/B978-0-12-409548-9.10632-3.
12. Köehler 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. 5. P. 10546–10463. DOI: 10.1029/2018GL079031.
13. Duveiller G., Filippini F., Walther S., Köhler P., Frankenberg C., Guanter L., Cescatti A. A spatially down-scaled sun-induced fluorescence global product for enhanced monitoring of vegetation productivity // Earth Syst. Sci. Data. 2020. V. 12. P. 1101–1116. DOI: 10.5194/essd-12-1101-2020.
14. 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. Environ. 2022. V. 268. Art. 112748. DOI: 10.1016/j.rse.2021.112748.
15. Anav A., Friedlingstein P., Beer C., Ciais Ph., Harper A., Jones Ch., Murray-Tortarolo G., Papale D., Parazoo N.C., Peylin Ph., Piao S., Sitch S., Viovy N., Wiltshire A., Zhao M. Spatiotemporal patterns of terrestrial gross primary production: A review // Rev. Geophys. 2015. V. 53, N 3. P. 785–818. DOI: 10.1002/2015RG000483.
16. 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 Sens. Environ. 2018. V. 204. P. 659–671. DOI: 10.1016/j.rse.2017.09.034.
17. Wang M., Zhang L. Synchronous changes of GPP and solar-induced chlorophyll fluorescence in a subtropical evergreen coniferous forest // Plants. 2023. V. 12, N 11. Art. 2224. DOI: 10.3390/plants12112224.
18. Turner A.J., Köhler P., Magney T.S., Frankenberg C., Fung I., Cohen R.C. Extreme events driving year-to-year differences in gross primary productivity across the US // Biogeosciences. 2021. V. 18. P. 6579–6588. DOI: 10.5194/bg-18-6579-2021.
19. Wang Y., Liu J., Wennberg P.L., He L., Bonal D., Köhler P., Frankenberg C., Sitch S.P., Friedlingstein P. Elucidating climatic drivers of photosynthesis by tropical forests // Global Change Biology. 2023. V. 29, N 17. P. 4811–4825. DOI: 10.1111/gcb.16837.
20. Kim J.E., Wang J.A., Li Y., Czimczik C.I., Randserson J.T. Wildfire-induced increases in photosynthesis in boreal forest ecosystems of North America // Glob. Chang. Biol. 2024. V. 30, N 1. DOI: 10.1111/gcb.17151.
21. 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.
22. Mucoz-Sabater J., Dutra E., Agustí-Panareda A., Albergel C., Arduini G., Balsamo G., Boussetta S., Choulga M., Harrigan S., Hersbach H., Martens B., Miralles D.G., Piles M., Rodriguez-Fernández N.J., Zsoter E., Buontempo C., Thépaut J.-N. ERA5-Land: A state-of-the-art global reanalysis dataset for land applications // Earth Syst. Sci. Data. 2021. V. 13. P. 4349–4383. DOI: 10.5194/essd-13-4349-2021.
23. BEGA-Science: Уникальный инструмент научного анализа данных спутниковых наблюдений. URL: <http://sci-vega.ru> (дата обращения: 25.04.2025).
24. Santoro M., Kirches G., Wevers J., Boettcher M., Brockmann C., Lamarche C. Land cover CCI. Productuser Guide. Version 2. Belgium: UCL-Geomatics, 2012. 105 p.
25. Li X., Xiao J. Global 0.05-Degree product of solar-induced chlorophyll fluorescence derived from OCO-2, MODIS, and reanalysis data // Remote Sens. 2019. V. 11. P. 517. DOI: 10.3390/rs11050517.
26. WMO-LCDNV. URL: <https://wmoLCDNV.ecmwf.int> (last access: 01.09.2025).
27. Liu R., Zhang X., Wang Y., Liu H., Ma M., Tang G. Global-scale ERA5 product precipitation and temperature evaluation // Ecol. Indic. 2024. V. 166, N 112481. DOI: 10.1016/j.ecolind.2024.112481.

28. *Chen X., Su Z., Ma Y., Cleverly J., Liddell M.* An accurate estimate of monthly mean land surface temperatures from MODIS clear-sky retrievals // *J. Hydro-meteor.* 2017. V. 18. P. 2827–2847. DOI: 10.1175/JHM-D-17-0009.1.
29. MODIS Land. Status for: Vegetation Indices (MOD13). URL: <https://modis-land.gsfc.nasa.gov/ValStatus.php?ProductID=MOD13> (last access: 25.04.2025).
30. *Pu J., Yan K., Roy S., Zhu Z., Rautiainen M., Knyazikhin Y., Myneni R.B.* Sensor-independent LAI/FPAR CDR: Reconstructing a global sensor-independent climate data record of MODIS and VIIRS LAI/FPAR from 2000 to 2022 // *Earth Syst. Sci. Data.* 2024. V. 16. P. 15–34. DOI: 10.5194/essd-16-15-2024.
31. *Rutan D.A., Kato S., Doelling D.R., Rose F.G., Nguyen L.T., Caldwell T.E., Loeb N.G.* CERES synoptic product: Methodology and validation of surface radiant flux // *J. Atmos. Ocean. Technol.* 2017. V. 32. P. 1121–1143. DOI: 10.1175/JTECH-D-14-00165.1.
32. QA4SM – Quality Assurance Service for Satellite Soil Moisture Data. URL: <https://qa4sm.eu/ui/home> (last access: 25.04.2015).
33. OGIMET: Professional information about meteorological conditions in the world. URL: <http://www.ogimet.com/home.phtml.en> (last access: 25.04.2025).
34. *Bai G., Lerebourg C., Clerici M., Gobron N., Muller J.-P., Song R., Dash J., Brown L., Morris H., Lopez-Baeza E., Albero E., Ghent D., Dodd E.* GBOV (Ground-Based Observation for Validation): A Copernicus service for validation of land products // *IEEE International Geoscience and Remote Sensing Symposium. Malaysia, Kuala Lumpur: IEEE, 2022.* P. 4304–4307. DOI: 10.1109/IGARSS46834.2022.9883162.
35. *Augustine J.A., De Luisi J.J., Long C.N.* SURFRAD – A national surface radiation budget network for atmospheric research // *Bull. Am. Meteorol. Soc.* 2000. V. 81, N 10. P. 2341–2358. DOI: 10.1175/1520-0477(2000)081<2341:SANSRB>2.3.CO;2.
36. *Dorigo W.A., Wagner W., Hohensinn R., Hahn S., Paulik C., Xaver A., Gruber A., Drusch M., Mecklenburg S., van Oevelen P., Robock A., Jackson T.* The International Soil Moisture Network: A data hosting facility for global *in situ* soil moisture measurements // *Hydrol. Earth Syst. Sci.* 2011. V. 15. P. 1675–698. DOI: 10.5194/hess-15-1675-2011.
37. *Кужевская И.В., Горбатенко В.П., Носырева О.В., Волкова М.А., Нечепуренко О.Е., Чурсин В.В., Чередько Н.Н.* Агроклиматические характеристики земель сельскохозяйственного назначения на территории Сибирского Федерального округа в условиях изменения климата // *Метеорол. и гидрол.* 2023. № 10. С. 77–87. DOI: 10.52002/0130-2906-2023-10-77-87.
38. *Абрамова О.Ф., Иванов А.Е., Инкин А.Н.* Обзор алгоритмов масштабирования растровой графики // *European Student Sci. J.* 2016. № 2. С. 1–6.
39. *Shekhar A., Chen J., Bhattacharjee S., Buras A., Castro A., Zang C., Rammig A.* Capturing the impact of the 2018 European drought and heat across different vegetation types using OCO-2 solar-induced fluorescence // *Remote Sens.* 2020. V. 12, N 19. DOI: 10.3390/rs12193249.
40. *Song A., Liang S., Li H., Yan B.* Effects of biodiversity on functional stability of freshwater wetlands: A systematic review // *Front. Microbiol.* 2024. V. 15. DOI: 10.3389/fmicb.2024.1397683.
41. *Kooistra L., Clevers J.* Estimating potato leaf chlorophyll content using ratio vegetation indices // *Remote Sens. Lett.* 2016. V. 7, N 6. P. 611–620. DOI: 10.1080/2150704X.2016.1171925.
42. *Liu J., Wennberg P.O., Parazoo N.C., Yin Y., Frankenberg C.* Observational constraints on the response of high-latitude northern forests to warming // *AGU Advances.* 2020. V. 1, N 4. Art. e2020AV000228. DOI: 10.1029/2020AV000228.
43. *Bachofen C., Poyatos R., Flo V., Martinez-Vilalta J., Mencuccini M., Granda V., Grossiord C.* Stand structure of Central European forests matters more than climate for transpiration sensitivity to VPD // *J. Appl. Ecol.* 2023. V. 60. P. 886–897. DOI: 10.1111/1365-2664.14383.
44. *Kopecký M., Hederová L., Macek M., Klinerová T., Wild J.* Forest plant indicator values for moisture reflect atmospheric vapour pressure deficit rather than soil water content // *New Phytol.* 2024. V. 244. P. 1801–1811. DOI: 10.1111/nph.20068.
45. *Otieno D., Lindner S., Muhr J., Broken W.* Sensitivity of peatland herbaceous vegetation to vapor pressure deficit influences net ecosystem CO₂ exchange // *Wetlands.* 2012. V. 32. P. 895–905. DOI: 10.1007/s13157-012-0322-8.
46. *Horel A., Zsigmond T., Farkas C., Gelyby G., Tyth E., Kern A., Bakacsi Z.* Climate change alters soil water dynamics under different land use types // *Sustainability.* 2022. V. 14, N 3908. DOI: 10.3390/su14073908.
47. *Архангельская Т.А.* Температурный режим комплексного почвенного покрова. М.: ГЕОС, 2012. 282 с.
48. *Rahimi E., Dong P., Jung C.* How do climate and latitude shape global tree canopy structure? // *Forests.* 2025. V. 16. Art. 432. DOI: 10.3390/f16030432.
49. *Карта растительности СССР (для высших учебных заведений).* Масштаб 1:4000000. М.: ГУГК, 1990.
50. *Информационная система «Почвенно-географическая база данных России».* URL: <https://soil-db.ru> (дата обращения: 25.04.2025).

A.V. Skorokhodov, T.B. Zhuravleva. **Photosynthetic activity of various vegetation types in southern Western Siberia and its relationship with environmental parameters based on reanalysis and satellite data.**

Solar-induced fluorescence is an indicator of plant photosynthetic activity that shows promise for monitoring ecosystem productivity on a global scale. The paper estimates the photosynthetic activity for the main phytocenoses of southern Western Siberia (grasslands, deciduous and light coniferous forests, croplands and wetlands) based on TROPOMI satellite data over the period 2018–2024. Using ERA5-Land reanalysis data and products obtained from MODIS and CERES sensor measurements, we study the correlations between solar-induced fluorescence and key environmental temperature and moisture parameters, vegetation indices, and photosynthetically active radiation, as well as between these characteristics (spatial resolution is 0.05°, temporal resolution is 1 month). The results describe the specifics of these relationships both for the main phytocenoses of the entire target region and their latitudinal variability for grasslands and deciduous forests.