

Прогноз урожайности яровых зерновых культур для юга Западной Сибири по потокам флуоресцентного излучения

А. Е. Карамзина, Е. Ю. Мордвин, А. А. Лагутин

Алтайский государственный университет, Барнаул, 656049, Россия

E-mail: alena.karamzina@alt22.ru

В работе обсуждается модель, связывающая урожайность яровых зерновых и зернобобовых культур юга Западной Сибири с потоками флуоресцентного излучения, которые испускаются в диапазоне 600–800 нм и представляют собой побочный продукт световой фазы фотосинтеза. Основным источником информации о потоках флуоресцентного излучения служит спектрометр TROPOMI, установленный на спутнике Sentinel-5 Precursor. Разработанная методология объединяет данные о флуоресцентном излучении с информацией о распределении посевных площадей (спутниковый продукт MCD12Q1/MODIS) и официальными данными Росстата по урожайности. Ключевая гипотеза основывается на линейной зависимости между региональными уровнями флуоресцентного излучения и валовой первичной продукцией, определяющими процесс формирования биомассы зерновых и зернобобовых культур. Проведенный анализ данных TROPOMI за период 2020–2024 годов выявил устойчивую корреляционную связь между максимумами значений флуоресценции и показателями урожайности. Установлено, что включение в модель функции потерь, которая опирается на гидротермический коэффициент Селянинова P для периода август–сентябрь, позволило лучшим образом согласовать максимум флуоресцентного излучения и удельную урожайность, полученную по данным Росстата. Оценка P выполнялась с использованием результатов субсезонной климатической модели SEAS5, скорректированных методом EQM. Для прогноза урожайности в Новосибирской, Омской, Кемеровской областях и Алтайском крае коэффициент детерминации R^2 для случая без учета потерь равен 0,17, 0,79, 0,53, 0,90, а для модели с потерями – 0,89, 0,88, 0,86, 0,97, соответственно. Результаты исследования подтверждают перспективность использования информации о флуоресцентном излучении для мониторинга и прогнозирования урожайности яровых сельскохозяйственных культур в зонах рискованного земледелия.

Ключевые слова: SIF, GPP, флуоресценция хлорофилла, фотосинтез, урожайность, Sentinel-5 Precursor, TROPOMI, ДЗЗ, SEAS5, юг Западной Сибири

Введение

Наблюдаемое изменение климата оказывает значительное воздействие на стабильность урожайности сельскохозяйственных культур, увеличивая показатели дисперсии и обостряя проблему неопределенности рисков в агропромышленном секторе (Proctor et al., 2025). В наибольшей степени это отражается на территориях рискованного земледелия, которым свойственны существенные аномалии приземной температуры воздуха и увлажненности почвы. Это создаёт дополнительные финансовые риски для сельхозпроизводителей, влияет на внутренний рынок продуктов питания, экспортные возможности и может приводить к ухудшению продовольственной безопасности для регионов с ограниченным запасом ресурсов (Tanaka et al., 2023).

Характерным представителем таких территорий является юг Западной Сибири — регион с развитым агропромышленным комплексом, где основная часть сельскохозяйственных угодий отведена под зерновые и кормовые культуры. Территория классифицируется как зона рискованного земледелия (Безруких и др., 2024), что требует внедрения инновационных методов контроля посевов и прогнозирования урожайности для снижения экономических рисков (Шмидт и др., 2022).

50 Качество ранних прогнозов урожайности играет важную роль в управлении
51 агропромышленным комплексом, в частности на финальных этапах производственного
52 цикла, включающих выбор оптимальных сроков начала уборочной кампании, и
53 организации процессов транспортировки и хранения продукции (Peng et al., 2018).
54 Несмотря на успехи существующих прогностических моделей, основанных на анализе
55 исторических данных, климатических переменных и состоянии посевов, сохраняется
56 необходимость в совершенствовании упрощенных подходов прогнозирования на
57 региональном уровне, опирающихся на оперативные наблюдения (Lungu et al., 2020).

58 Традиционно для решения этой задачи используются вегетационные индексы,
59 получаемые по данным дистанционного зондирования (Ерошенко и др., 2016; Илларионова
60 и др., 2023; Лупян и др., 2017; Береза и др., 2015), среди которых выделяется
61 нормализованный разностный вегетационный индекс (Normalized difference vegetation
62 index, NDVI) (Rouse et al., 1974; Tucker, 1979). Однако в ряде работ отмечается низкая
63 чувствительность NDVI к суточным и сезонным вариациям интенсивности фотосинтеза,
64 которые обусловлены реакцией растений на неблагоприятные погодные условия (Fang et
65 al., 2023).

66 Ряд моделей, описывающих жизненный цикл с.-х. культур, связывают урожайность
67 с приростом зелёной биомассы (Reeves et al., 2005; Marshall et al., 2018), которую принято
68 называть «общей первичной продукцией растения» (от английского gross primary production
69 — GPP). GPP эквивалентно количеству диоксида углерода (CO_2), поглощаемого
70 растениями на единице площади за определённый промежуток времени, и выражается в
71 граммах на квадратный метр в день ($гг/(м^2 \cdot \text{день})$).

72 В настоящее время установлена линейная связь GPP с флуоресцентным излучением
73 хлорофилла, индуцированным солнечным светом (SIF, англ. sun-induced chlorophyll
74 fluorescence) (Li et al., 2022). В частности в (Magney et al., 2019) отмечается, что данные о
75 SIF, получаемые с использованием метеорологических вышек (Flux Tower), хорошо
76 согласуются со спутниковыми наблюдениями. Это указывает на перспективность
77 использования SIF для мониторинга состояния растительного покрова, а также оценки его
78 изменений под воздействием меняющихся условий окружающей среды (Liu et al., 2022;
79 Шокин и др., 2023).

80 Целью данной работы является разработка и верификация прогностической модели,
81 связывающей урожайность яровых зерновых и зернобобовых культур юга Западной
82 Сибири с потоками флуоресцентного излучения, которые регистрируются спутниковым
83 спектрометром TROPOMI (Butz et al., 2012).

Приборы и методы

Связь флуоресценции хлорофилла и GPP

Рассмотрим некоторые аспекты процесса фотосинтеза и газообмена. Атмосферный углекислый газ попадает в растение через устьица — поры на листьях, которые регулируют интенсивность обмена с окружающей средой посредством устьичной щели (Xiao et al., 2021). На *рис. 1* качественно представлен суточный ход интенсивности фотосинтеза и транспирации (дыхания) растений. Изображение устьиц получено авторами работы на кафедре ботаники института биологии и биотехнологии Алтайского государственного университета. Зелёная часть линии указывает на беспрепятственный газообмен, в то время как красная обозначает закрытие устьичной щели, что может происходить при переувлажнении, недостатке влаги или перегреве (Xiao et al., 2021). В связи с этим, как правило, в полуденное время наблюдается спад интенсивности фотосинтеза, что хорошо иллюстрируется линией на рисунке. Увеличение водного и теплового стресса приводит к изменениям в функционировании растений, что проявляется в более частом закрытии устьиц, известном как полуденная депрессия (Xiao et al., 2021).

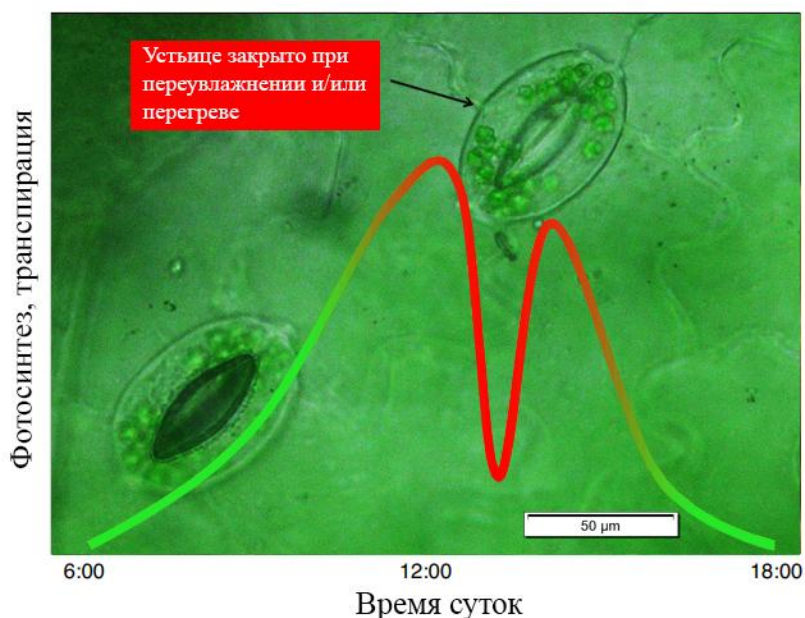


Рис. 1. Изменение интенсивности фотосинтеза и транспирации растений в течение светового дня.

Газообмен сопровождается не только регуляцией водного баланса, но и захватом углекислого газа из атмосферы, часть которого усваивается в процессе фотосинтеза (Tucker et al., 1986). Фотосинтетические пигменты поглощают солнечное излучение в определённом спектральном диапазоне, интенсивность которого обозначается как PAR

(англ. Photosynthetically Active Radiation). Эта фаза называется светозависимой или световой. Дальнейшая реакция по преобразованию углекислого газа и воды в строительные материалы может происходить без участия солнечного излучения; однако она использует продукты, полученные на предыдущей светозависимой стадии.

Доля PAR (англ. fPAR, fraction PAR), усвоенная растением, переводит хлорофилл в первое возбуждённое состояние E1 (при поглощении фотона из красной области видимого спектра) или второе состояние E2 (при поглощении фотона из синей области видимого спектра). В состоянии E2 молекула быстро переходит на первый энергетический уровень E1 с выделением тепла (Штирбет и др., 2014). Состояние E1 обеспечивает энергией фотохимические процессы, когда система не испытывает стресса. В противном случае излишки fPAR могут приводить к перегреву растения. Обратный переход молекулы в основное энергетическое состояние сопровождается образованием кванта света (~ 0,5–2% от энергии первого возбуждённого состояния) в виде флуоресцентного излучения в диапазоне от 600 до 800 нм во время световой фазы (Liu et al., 2022).

Спектрорадиометр MODIS

Спектрорадиометр MODIS (Moderate Resolution Imaging Spectroradiometer) (Salomonson et al., 1989) установлен на спутниках Terra и Aqua, запущенных в рамках программы NASA (National Aeronautics and Space Administration) EOS (Earth Observing System). MODIS регистрирует излучение в диапазоне 0,4 — 14,4 мкм с использованием 36 спектральных каналов шириной от 0,01 до 0,5 мкм. Спектрорадиометр обеспечивает обзор поверхности Земли с пространственным разрешением от 250 м до 1000 м в надире (в зависимости от канала), охватывая полосу шириной 2330 км, что позволяет осуществлять мониторинг почти всей поверхности планеты в течение суток.

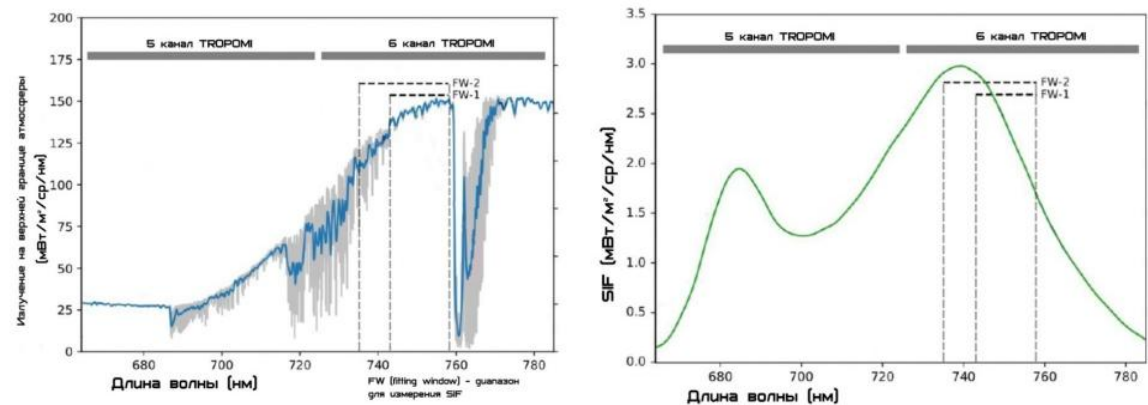
Продукт MCD12Q1 (Friedl, Sulla-Menashe, 2022) представляет собой результаты совместной обработки наблюдений приборов MODIS, установленных на спутниках Terra и Aqua. Он содержит наборы данных, которые отображают информацию о типах подстилающей поверхности Земли с пространственным разрешением 500 метров. Данный продукт создан на основе классификаций спектрально–временных характеристик, полученных с использованием измерений спектрорадиометров MODIS в течение одного года. Используемый алгоритм выполняет классификацию объектов, опираясь на годовые сигнатуры коэффициентов спектральной яркости поверхности (см. например, Friedl et al., 2002, 2010). В результате выделяются различные типы подстилающей поверхности, такие как лесные массивы (лиственные/хвойные), кустарники, травянистая растительность,

сельскохозяйственные культуры, пустынные территории, городская застройка, снег, лёд и водные объекты. Кроме того, MCD12Q1 включает оценку состояния здоровья растительности с использованием индекса NDVI.

Спектрометр TROPOMI/S5P

Спутник Sentinel-5 Precursor был запущен 13 октября 2017 года Европейским космическим агентством в рамках программы Copernicus (Berger et al., 2012). Основным инструментом Sentinel-5 Precursor является спектрометр TROPOMI, измеряющий уходящее из атмосферы Земли излучение в ультрафиолетовом (UV), видимом (VIS), ближнем (NIR) и среднем инфракрасном (SWIR) диапазонах. Спектрометр TROPOMI выполняет мониторинг содержания озона, диоксида серы, монооксида углерода, аэрозоля, метана, формальдегида и оксида азота в атмосфере (Friedl, Sulla-Menashe, 2022). Прибор обладает широкой полосой сканирования, составляющей примерно 2670 км с пространственным разрешением $5,5 \times 3,5$ км (Veefkind et al., 2012), что позволяет осуществлять ежедневные наблюдения на глобальном уровне.

Продукт TROPOSIF (S5P-TROPOMI SIF Data Product), разработанный в Политехническом университете Валенсии, содержит данные о флуоресценции хлорофилла, полученные с использованием спектрометра TROPOMI (Guanter et al., 2021). На рис. 2а пунктиром обозначены спектральные диапазоны в 5-й и 6-й группе каналов TROPOMI (FW-1, 743–758 нм и FW-2, 735–758 нм), которые используются для извлечения информации о SIF. Синей кривой на данном рисунке представлена интенсивность излучения на верхней границе атмосферы, которая зависит от оптических свойств среды.



а) б)

Рис. 2. Интенсивность излучения на верхней границе атмосферы и интенсивность SIF в спектральном диапазоне 665–785 нм, регистрируемые группами каналов 5 и 6 TROPOMI (по данным Guanter et al., 2021).

Спектр, характерный для SIF, показан на *рис. 2б* зелёной кривой: наблюдается два максимума при длинах волн 685 нм и 740 нм. Первый максимум связан с флуоресценцией хлорофилла *b*, второй – с хлорофиллом *a* (Ayudhya et al., 2015). Продукт TROPOSIF также включает оценку суточного интеграла SIF, обозначенного как SIF_Corr (Guanter et al., 2021).

Результаты

На начальном этапе исследования была построена маска с.-х. земель юга Западной Сибири, выделенных под возделывание сельскохозяйственных культур. Рассматривались территории Алтайского края, Новосибирской, Омской и Кемеровской областей. Поскольку в исследуемом регионе преобладает культивация зерновых и зернобобовых культур, для решения поставленной задачи в первом приближении достаточно использовать обобщенную карту возделываемых земель. В работе для этой цели использовался продукт MCD12Q1 версии 6.1. Так как план землепользования региона менялся незначительно в течение последнего десятилетия, данные MCD12Q1 за 2020 год послужили шаблоном для маскирования.

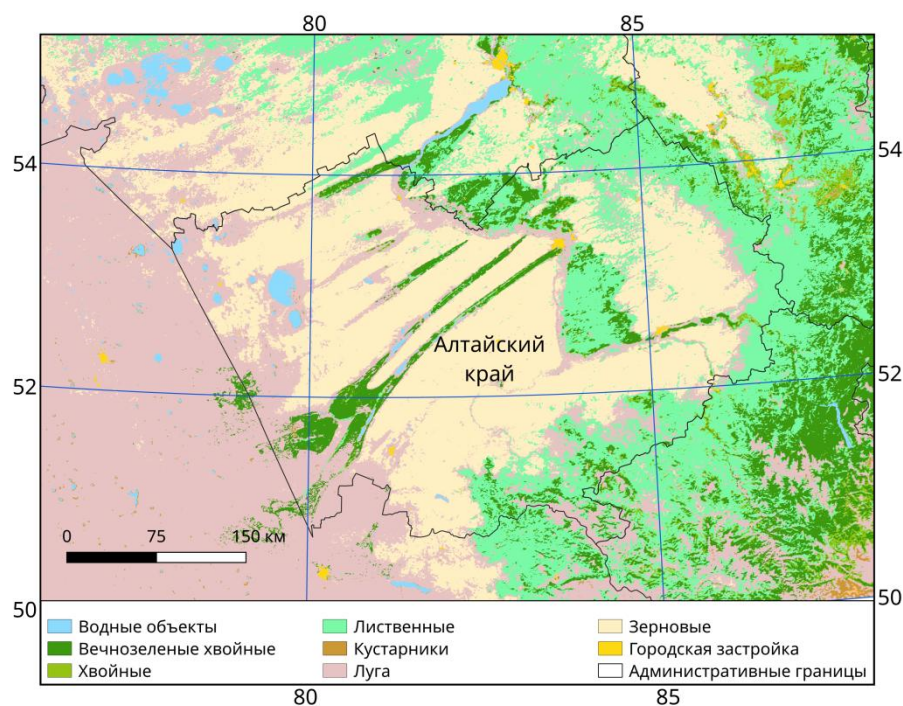


Рис. 3. Классификация типов подстилающей поверхности по данным продукта MCD12Q1 (Friedl, Sulla-Menashe, 2022) за 2020 год для территории Алтайского края

В качестве примера на *рис. 3* представлены результаты MCD12Q1 за 2020 год для Алтайского края. На рисунке видно, что большую часть территории составляют площади, используемые для возделывания с.-х. культур, которые обозначены как «зерновые», а согласно классификации MCD12Q1 — «crops cereal». Эти результаты послужили основой

для маскирования данных о SIF_Corr на длине волны 743 нм (далее SIF), полученных с помощью алгоритма TROPoSIF. Данная процедура применялась для каждого снимка TROPOMI. Таким образом, была создана база наблюдений SIF для с.-х. земель исследуемого региона для периода 2020-2024 гг.

Следует отметить, что существует несколько химических схем фотосинтеза. Большинство растений исследуемого региона относятся к типу C_3 , который описывается циклом Кальвина (Федулов, 2019). Интенсивность развития таких систем напрямую связана с доступностью влаги, т.к. цикл Кальвина сопровождается большими потерями воды в процессе транспирации. Альтернативная схема C_4 описывается циклом Хэтча-Слэка, который является менее влагозатратным по сравнению с C_3 , однако требует большей интенсивности PAR для поддержания фотохимических процессов (Федулов, 2019). К растениям C_4 относятся кукуруза, сахарный тростник, просо и сорго. Таким образом, при ассимиляции 1 грамма CO_2 в схемах C_3 и C_4 количество энергетических переходов хлорофилла остается неэквивалентным, что приводит к различиям в интенсивности SIF.

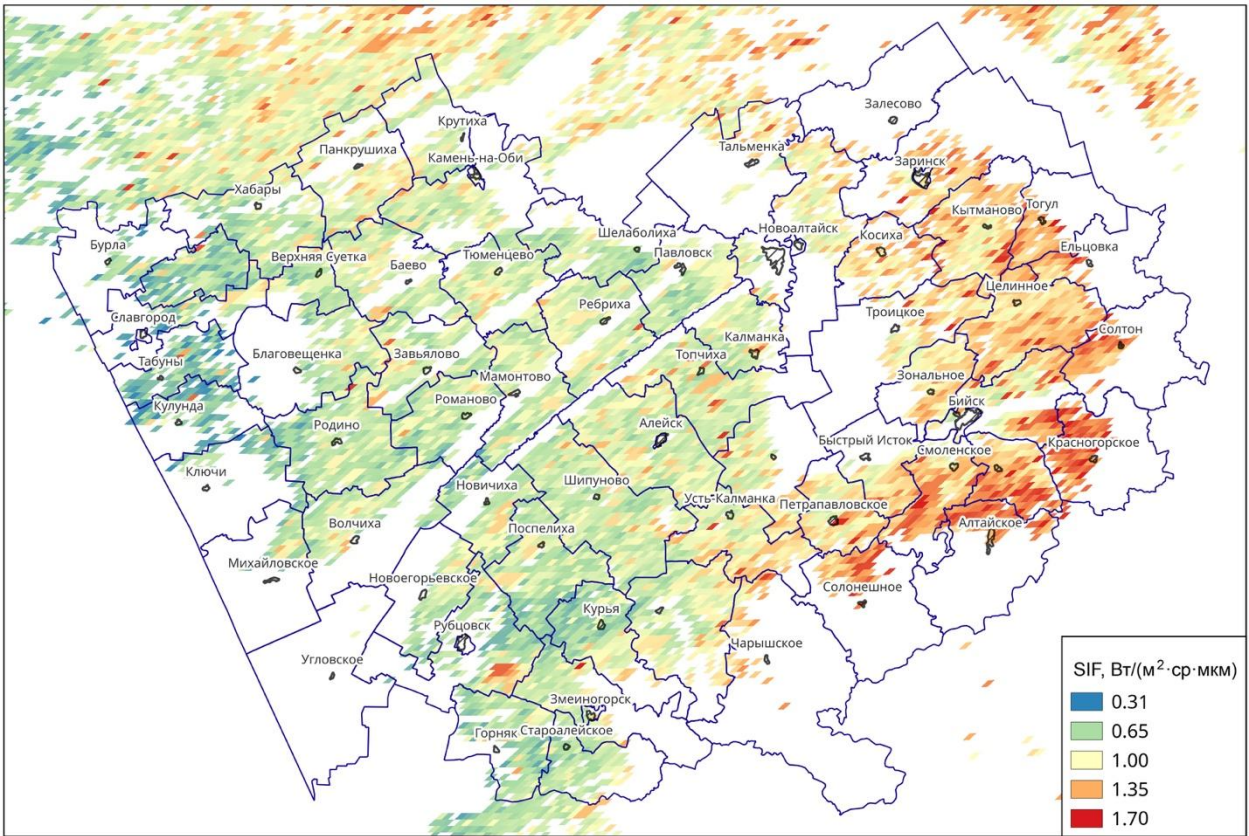


Рис. 4. Максимум в наблюдениях SIF для пахотных земель Алтайского края по данным S5P за период июнь–июль 2020 года

На рис. 4 представлено распределение максимальных значений флуоресценции хлорофилла в Алтайском крае за период июнь-июль 2020 года, которые варьируются в

225 диапазоне от 0.3 до 1.7 Вт/ (м² · ср · мкм). Наибольшей интенсивности флуоресцентного
226 излучения соответствует красный цвет, наименьшей — синий. Такой градиент в масштабах
227 региона обусловлен различным уровнем водного стресса, испытываемого растениями в
228 период вегетации. В восточной части региона наблюдается более высокая
229 влагообеспеченность, что способствует быстрому восполнению потерь воды,
230 происходящих в процессе фотосинтеза и транспирации (Mordvin et al., 2024). Следствием
231 этого является высокая интенсивность фотосинтетических процессов. В западной части
232 края доступность влаги и влажность воздуха ниже, что способствует переходу растений в
233 режим экономии водных ресурсов. При этом газообмен через устьичную щель сокращается,
234 что приводит к снижению интенсивности фотосинтеза.

235 На *рис. 5а* представлена межгодовая изменчивость SIF на территории Алтайского
236 края для периода активной вегетации (15 апреля–30 сентября) в 2020–2024 гг. Показанный
237 временной ряд отражает межгодовые вариации в динамике развития растений и может
238 зависеть как от климатических, так и от инфекционных (грибы, бактерии, вирусы и т.д.)
239 факторов. Максимум флуоресценции хлорофилла характерен для середины летнего
240 периода, при этом в разные годы высота этого максимума варьируется от 0.6 до 1
241 Вт/(м² · ср · мкм).

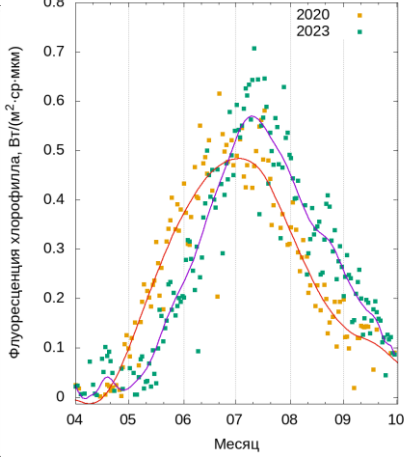
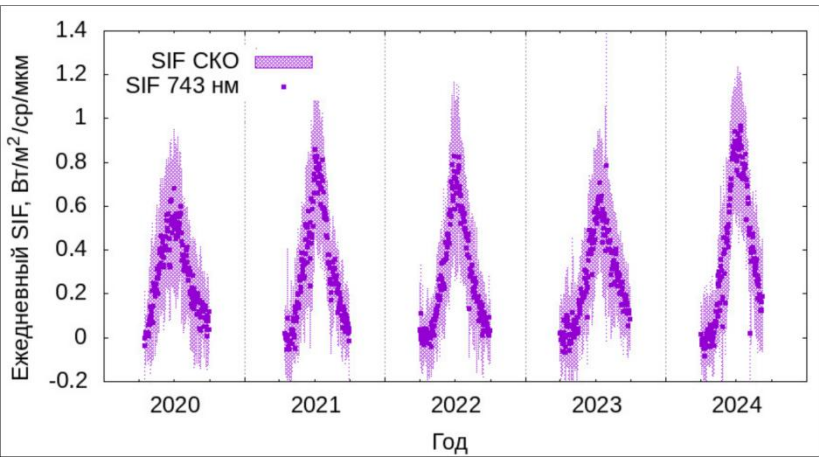


Рис. 5.а Годовой ход и межгодовые вариации SIF для земель с/х на территории Алтайского края в 2020–2024 гг. по данным TROPOMI/Sentinel-5 Precursor

Рис. 5.б Сезонный ход SIF для земель с/х назначения Алтайского края в 2020 и 2023

243 Дополнительно был проведён сравнительный анализ годового хода флуоресценции
244 хлорофилла в 2020 и 2023 годах, когда наблюдался низкий уровень SIF. На *рис. 5.б* показана
245 динамика SIF для этих сезонов. Линией на рисунке обозначена аппроксимация,
246 выполненная кривыми Безье (Elber, 1997). Хорошо видно, что начало вегетационного
247 периода в 2020 году смещено относительно 2023 года приблизительно на 2 недели, а высота
248 максимума на ~ 15% ниже. Следует отметить, что сопутствующие неблагоприятные
249

погодные условия в летнем периоде 2020 года характеризовались низкими температурами, тогда как июнь 2023 года был отмечен засухой. Несмотря на климатические различия этих сезонов, для региона в целом наблюдалась низкая урожайность яровых зерновых культур, что зафиксировано в отчете Федеральной службы государственной статистики (Росстат) (<https://rosstat.gov.ru/compendium/document/13277>).

Связь урожайности и SIF

Существующая функциональная зависимость между GPP и удельной продуктивностью «полезной» биомассы W в виде зерна (далее удельная урожайность) (Marshall et al., 2018), свидетельствует о наличии корреляции между максимумом SIF (далее SIF_{max}) и W . Это является следствием того, что SIF_{max} наблюдается во время фаз колошения и цветения зерновых культур.

В работе поиск SIF_{max} выполнялся с помощью метода скользящего среднего на временном ряде SIF с окном 5 дней для каждого пикселя серии изображений TROPOMI. После этого находилось среднее значение по всей области исследования. Оценка удельной урожайности зерновых и зернобобовых культур W была сделана на основе данных Росстата (<https://rosstat.gov.ru/compendium/document/13277>) с использованием выражения (1)

$$W = M/S \quad . \quad (1)$$

Здесь M – фактическая урожайность (в млн. тонн); S – обрабатываемая площадь (в млн.га). Для перехода от SIF_{max} к удельной урожайности W был найден коэффициент C согласно следующему выражению:

$$W = C \times SIF_{max}. \quad (2)$$

Как правило, прогностические оценки удельной урожайности \tilde{W} расходятся с фактическими данными W , их существенная разница может указывать на неучтенные в модели эффекты. В ряде работ отмечается (см. например, Амирова, 2023; Симоненко, 2019), что ключевым фактором, влияющим на снижение прогнозируемой урожайности, является комплекс неблагоприятных погодных условий в начале вегетационного периода, включающий дефицит влаги и температурные аномалии.

Также следует учитывать потери во время уборочной кампании, которые обусловлены климатическими факторами. В этом случае W является долей от \tilde{W} , что можно выразить через введение функции потерь l согласно (3):

$$W = \tilde{W}(1 - l). \quad (3)$$

В работе предполагается, что основная часть потерь в модели, основанной на наблюдениях SIF_{max} , обусловлена избыточной увлажненностью в период уборочной

кампании (август-сентябрь), которая приводит к затруднениям в механизированной обработке. В силу этого в работе предлагается выразить функцию потерь l через гидротермический коэффициент Селянинова P (°C/см) для периода август-сентябрь

$$l = (P - t) \times \varepsilon, \quad (4)$$

где t – пороговое значение P , при котором возможны потери, ε (°C/см) – масштабирующий множитель.

Согласно (Кельчевская, 1971), гидротермический коэффициент определяется как

$$P = 10 \sum_{n=1}^{365} R_n / \sum_{n=1}^{365} T_n,$$

где R_n – суммарное суточное количество осадков (мм) для дня n , T_n – среднесуточная температура приземного слоя воздуха (°C). Суммирование выполняется при условии $T > T_k$, где T_k – пороговое значение температуры, которое зависит от с.-х. культуры. Общепринятым значением является $T_k = +10$ °C,

На заключительном этапе работы для 2020-2024 гг. был найден коэффициент перехода C для двух случаев: без учета потерь $C1$ и с учетом потерь – $C2$. Поиск этих параметров выполнялся согласно зависимости (2) нелинейным методом наименьших квадратов (алгоритм Левенберга–Марквардта). Параметры t и ε также были получены в результате выше обозначенной процедуры фитирования, согласно выражениям (3) и (4).

Оценка P выполнялась с использованием данных субсезонной климатической модели SEAS5 версии 5.1 (Johnson et al., 2019), где для коррекции элементов ансамбля SEAS5 применялись данные реанализа ERA-5 land (Muñoz-Sabater et al., 2021) и метод EQM (Equidistant Quantile Mapping) (Cannon et al., 2015). Здесь обучающая выборка задавалась для периода 1981-2016 гг, в которую вошли среднемесячная температура приземного слоя воздуха и суммарные осадки с разрешением 0.1° для области 56.5° - 50.5° с.ш., 70° - 90° в.д. Прогноз составлялся для августа и сентября. Дата старта модели соответствовала июлю исследуемого года. Сопоставление скорректированного прогноза среднемесячной температуры приземного слоя воздуха и суммарных осадков для периода 2017-2024 гг с данными ERA-5 land показало их удовлетворительное согласие, где R^2 равен 0.82 и 0.47, соответственно. При этом MAE обозначенных климатических параметров равно 0.4 °C и 1 мм/день, что несколько меньше среднего по ансамблю – 0.6 °C и 2 мм/день.

В табл. 1 представлены значения всех компонентов, входящих в модель. Рис. 6 демонстрирует диаграммы рассеяния удельной урожайности W , основанные на данных Росстата и восстановленные с использованием наблюдений TROPOMI/Sentinel-5 Precursor. Хорошо видно, что включение функции потерь в модель улучшило согласование

прогностических оценок W и фактических значений (Росстат). В частности, значительно увеличился коэффициент детерминации R^2 для более влажных регионов, таких как Новосибирская и Кемеровская области. Аналогичные улучшения статистических метрик зафиксированы для степных биомов. Следует отметить, что для условно влажных регионов наблюдаются наиболее высокие значения C , что может свидетельствовать о более благоприятных метеорологических условиях во время фаз колошения и цветения зерновых культур.

Таким образом, в отсутствии информации о P , предварительный прогноз урожайности может быть сформирован с использованием коэффициента $C1$ во второй половине июля. Однако в условиях высокой увлажненности в августе-сентябре ($P > 0.75$) ошибка прогноза может достигать 25%, что, например, наблюдается в 2024 году.

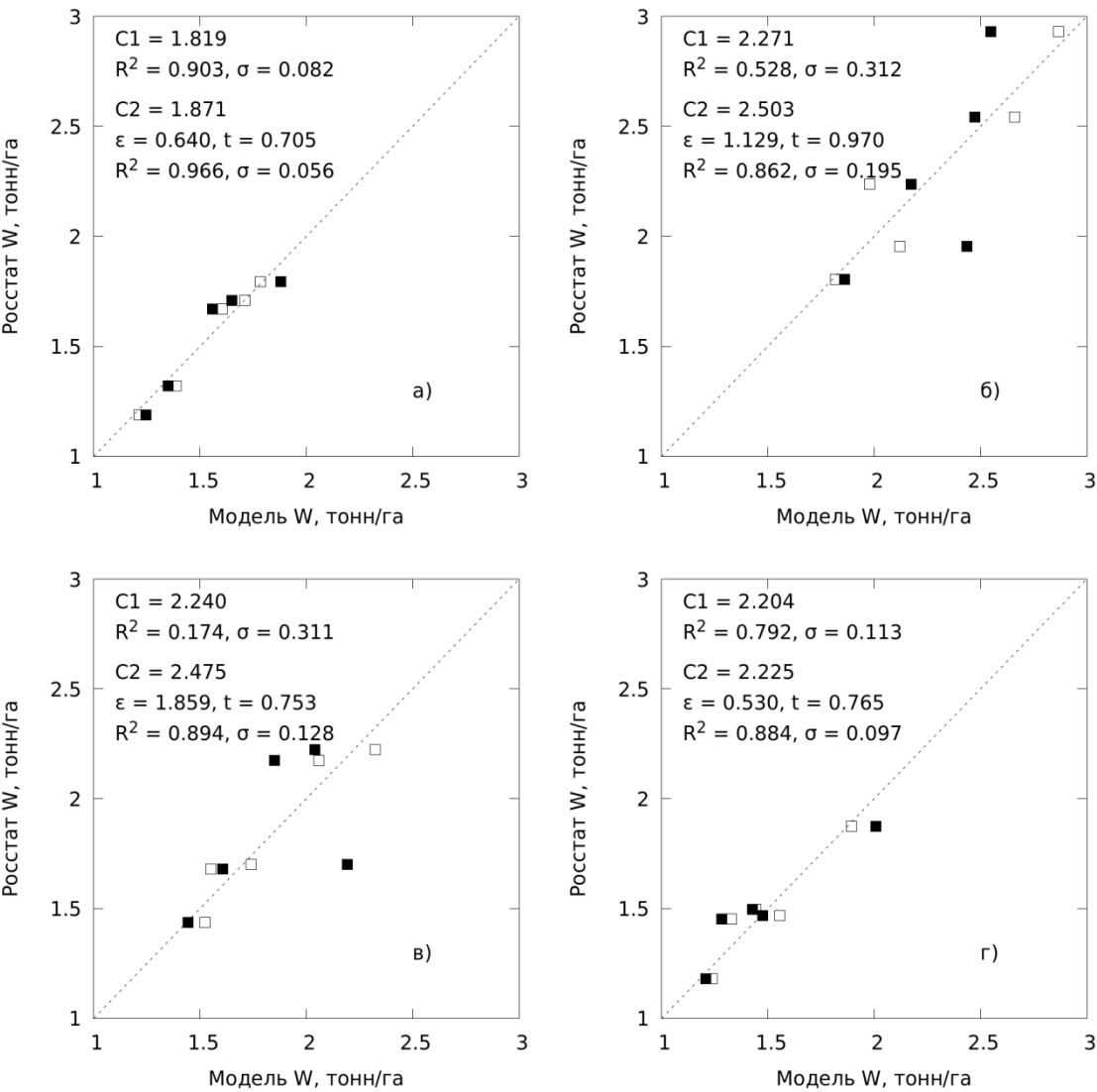
Таблица 1. Компоненты модели связывающей урожайность яровых зерновых и зернобобовых культур юга Западной Сибири с потоками флуоресцентного излучения

Регион	Год	SIF_{max} , Вт/(м ² · ср · мкм)	S , млн. га	M , млн. тонн	P , см/°C
Алтайский край	2020	0.734	3.289	3.913	0.786
	2021	0.958	3.235	5.529	0.692
	2022	0.900	3.353	5.597	0.704
	2023	0.773	3.353	4.431	0.703
	2024	1.074	3.115	5.469	0.826
Омская область	2020	0.686	2.028	3.034	0.763
	2021	0.711	1.998	2.934	0.684
	2022	0.645	2.010	2.916	0.716
	2023	0.597	2.128	2.511	0.737
	2024	0.957	2.029	3.803	0.890
Новосибирская область	2020	0.759	1.483	2.491	0.822
	2021	0.959	1.505	3.348	0.737
	2022	0.879	1.535	3.336	0.749
	2023	0.690	1.569	2.254	0.777
	2024	1.022	1.420	2.379	0.905
Кемеровская область	2020	0.996	0.576	1.289	1.125
	2021	1.134	0.610	1.550	0.991
	2022	1.183	0.626	1.833	0.952
	2023	0.862	0.635	1.147	1.070

	2024	1.121	0.576	1.131	1.156
--	------	-------	-------	-------	-------

333

334



335

336

337 *Рисунок 6. Диаграммы рассеяния удельной урожайности по данным SIF TROPOMI/Sentinel-*
338 *5 Precursor и Р для 4-х регионов юга Западной Сибири в 2020–2024 гг.: а – Алтайский край,*
339 *б – Кемеровская область, в – Новосибирская область, г – Омская область*
340

341

342

343

344

345

346

347

348

Следует отметить несколько ограничений, которые могут повлиять на точность обсуждаемой модели. Во-первых, предполагается наличие неточностей в данных Росстата, вызванных различными факторами. С другой стороны, оценки SIF_{max} , полученные с использованием наблюдений TROPOMI, имеют значительную погрешность (~25%) и грубое пространственное разрешение $5,5 \times 3,5$ км, что также негативно сказывается на точности модели. В-третьих, большая площадь исследуемых регионов затрудняет учет локальных климатических и технологических особенностей. Кроме того, предложенная модель не отделяет полезную биомассу от сопутствующей сорной растительности. Учет

этого фактора в ряде случаев может привести к улучшению точности прогноза урожайности (Спиридонов и др., 2019).

Заключение. В работе предложена модель, связывающая урожайность яровых зерновых и зернобобовых культур юга Западной Сибири с потоками флуоресцентного излучения, регистрируемыми спектрометром TROPOMI/Sentinel-5 Precursor. Установлена устойчивая корреляционная связь между максимумом в спутниковых наблюдениях флуоресцентного излучения и урожайностью зерновых и зернобобовых культур для периода 2020-2024 гг. Показано, что включение в модель функции потерь, основанной на гидротермическом коэффициенте Селянинова P для периода август-сентябрь, позволяет более точно согласовать максимальное значение флуоресценции и удельную урожайность, полученную по данным Росстата. Оценка P выполнялась с использованием результатов субсезонной климатической модели SEAS5, скорректированных методом EQM. Фактор увлажнения в августе-сентябре, при котором неизбежны потери, следует учитывать для $P > 0.75$. Показано, что для прогноза урожайности в Новосибирской, Омской, Кемеровской областях и Алтайском крае коэффициент детерминации R^2 для случая без учета потерь составляет 0,17, 0,79, 0,53, 0,90, тогда как в модели с учетом потерь он равен 0,89, 0,88, 0,86, 0,97. Следующий этап предполагает работу с другими методами коррекции данных SEAS5 с целью улучшения точности долгосрочного прогнозирования метеорологических условий.

Работа выполнена при поддержке Министерства науки и высшего образования РФ (государственное задание на проведение научных исследований, выполняемых в АлтГУ, проект FZMW-2023-0007).

Литература

1. *Амирова Т. Н.* Влияние потерь влаги на урожайность при ирригационных работах по методу кругового центра орошения // Мелиорация и водное хозяйство. 2023. № 2. С. 4-7. DOI 10.32962/0235-2524-2023-2-4-7.
2. *Безруких В. А., Авдеева Е. В., Иванов Д. В. и др.* «Рискованное земледелие» или риски в аграрном природопользовании бореальной зоны Приенисейской Сибири // Хвойные бореальной зоны. Т.42. № 2. 2024. с.12-15.
3. *Береза О.В., Страшная А.И., Луян Е.А.* О возможности прогнозирования урожайности озимой пшеницы в Среднем Поволжье на основе комплексирования наземных и спутниковых данных// Современные проблемы дистанционного зондирования Земли из космоса. 2015. Т. 12. № 1. С. 18-30.
4. *Ерошенко Ф.В., Барталев С.А., Сторчак И.Г. и Плотников Д.Е.* Возможности дистанционной оценки урожайности озимой пшеницы на основе

вегетационного индекса фотосинтетического потенциала. Современные проблемы дистанционного зондирования Земли из космоса. 2016. Т. 13. № 4. С. 99–112.

5. Илларионова Л.В., Степанов А.С., Прохорец И.О. Аппроксимация временных рядов NDVI нелинейными функциями для мониторинга сельхозкультур Дальнего Востока// Материалы 21-й Международной конференции «Современные проблемы дистанционного зондирования Земли из космоса». 2023.

6. Кельчевская Л.С. Методы обработки наблюдений в агроклиматологии. Л.: Гидрометеидаттеидат. 1971. 215 с. <http://mgmtmo.ru/edumat/agro/kelchevskaya.pdf>

7. Лупян Е.А., Барталев С.А., Крашенинникова Ю.С. и др. Аномальное развитие яровых культур в регионах европейской части России в 2017 году // Современные проблемы дистанционного зондирования Земли из космоса. 2017. Т. 14. № 3. С. 324–329.

8. Симоненко Е. И. Влияние климатического фактора на потери урожайности зерновых культур // Colloquium-Journal. 2019. № 22-7(46). С. 26-27.

9. Спиридонов Ю.Я., Будынков Н.И., Азизов З.М. и др. Влияние комплексных мер борьбы с сорняками на урожайность и качество озимой пшеницы // Вавиловские чтения - 2019: Международная научно-практическая конференция, посвященной 132-ой годовщине со дня рождения академика Н.И. Вавилова. Саратов. 2019. с. 228-230.

10. Федулов, Ю. П. Фотосинтез и дыхание растений: учебное пособие для бакалавров, изучающих дисциплину «Физиология и биохимия растений»// Кубанский государственный аграрный университет им. И.Т. Трубилина. 2019. 101 с.

11. Шмидт И.В., Латыпова А.М., Царенко А.Л. Применение данных дистанционного зондирования Земли для прогнозирования урожайности сельскохозяйственных культур// Региональные геосистемы. 2022. Т. 46. №4. DOI: 10.52575/2712-7443-2022-46-4-539-554.

12. Шокин Ю.И., Лагутин А.А., Мордвин Е.Ю. и др. Технология оценки валовой первичной продукции по данным спутниковых наблюдений// Вычислительные технологии. 2023. Т. 28. №2. С.103–114. DOI:10.25743/ICT.2023.28.2.009

13. Штирбет А., Ризниченко Г., Рубин А. и др. Моделирование кинетики флуоресценции хлорофилла а: связь с фотосинтезом (обзор) // Биохимия. 2014. Т. 79. № 4. С. 379-412.

14. Ayudhya T., Posey F. T., Tyus J. C. et al. Using a Microscale Approach To Rapidly Separate and Characterize Three Photosynthetic Pigment Species from Fern // Journal of Chemical Education. 2015. V. 92. Issue 5. DOI:10.1021/ed500344c.

15. Berger M., Moreno J., Johannessen J. A. et al. ESA's sentinel missions in support of Earth system science // Remote Sensing of Environment. 2012. V.120. Pp. 84-90. DOI: 10.1016/j.rse.2011.07.023.

16. Bi Y., Wang Q., Yang Z. et al. TanSat ACGS on-orbit spectral calibration by use of individual solar lines and entire atmospheric spectra // Atmos. Meas. Tech. Discuss. [preprint]. 2020. DOI: 10.5194/amt-2020-20.

17. Butz A., Galli A., Hasekamp O. et al. TROPOMI aboard Sentinel-5 Precursor: Prospective performance of CH₄ retrievals for aerosol and cirrus loaded atmospheres // Remote Sensing of Environment. 2012. V. 120. Pp. 267-276. DOI: 10.1016/j.rse.2011.05.030.

18. Cannon A.J., Sobie S.R., Murdock T.Q. Bias Correction of GCM Precipitation by Quantile Mapping: How Well Do Methods Preserve Changes in Quantiles and Extremes?// *Journal of Climate*. 2015. V.28. Pp. 6938–6959. DOI: 10.1175/JCLI-D-14-00754.1.
19. Doughty R., Kurosu T. P., Parazoo N. et al. Global GOSAT, OCO-2, and OCO-3 solar-induced chlorophyll fluorescence datasets // *Supplement of Earth Syst. Sci. Data*. 14. 2022. P. 1513–1529 DOI: 10.5194/essd-14-1513-2022-supplement.
20. Elber G., Lee I.-K., Kim M.-S. Comparing Offset Curve Approximation Methods // *IEEE Computer Graphics and Applications*. V. 17. No 3. Pp. 62–71. DOI: 10.1109/38.586019.
21. Fang J., Li X., Xiao J. et al. Vegetation photosynthetic phenology dataset in northern terrestrial ecosystems// *Scientific Data*. 2023. DOI: 10.1038/s41597-023-02224-w.
22. Frankenberg C., Pollock R., Lee R.A.M. et al. The Orbiting Carbon Observatory (OCO-2): spectrometer performance evaluation using pre-launch direct sun measurements // *Atmospheric Measurement Techniques*. 2015. V. 8. Pp. 301–313. DOI: 10.5194/amt-8-301-2015.
23. Friedl M., Sulla-Menashe, D. (2022). MODIS/Terra+Aqua Land Cover Type Yearly L3 Global 500m SIN Grid V061 [Data set]. NASA Land Processes Distributed Active Archive Center. DOI: 10.5067/MODIS/MCD12Q1.061 (Date Accessed: 2025-07-03).
24. Friedl M.A., McIver D.K., Hodges J.C.F. et al. Global land cover mapping from MODIS: algorithms and early results // *Remote Sensing of Environment*. 2002. V. 83. P. 287 – 302. DOI: 10.1016/S0034-4257(02)00078-0.
25. Friedl M. A., Sulla-Menashe D., Tan B. et al. MODIS Collection 5 global land cover: Algorithm refinements and characterization of new datasets // *Remote Sensing of Environment*. 2010. V.114. P. 168–182. DOI: 10.1016/j.rse.2009.08.016.
26. Guanter L., Bacour C., Schneider A. et al. The TROPISIF global suninduced fluorescence dataset from the Sentinel-5P TROPOMI mission// *Earth Syst. Sci. Data*. 2021. V.13. Issue 11. DOI:10.5194/essd-13-5423-2021.
27. Hersbach H., Bell B., Berrisford P. et al. The ERA5 global reanalysis. // *Q J R Meteorol Soc*. 2020. V. 146. Pp.1999–2049. DOI: 10.1002/qj.3803.
28. Johnson S. J., Stockdale T.N., Ferranti L. et al. SEAS5: the new ECMWF seasonal forecast system // *Geoscientific Model Development*. 2019. V. 12(3). Pp. 1087–1117. DOI: 10.5194/gmd-12-1087-2019.
29. Li X., Xiao J. TROPOMI observations allow for robust exploration of the relationship between solar-induced chlorophyll fluorescence and terrestrial gross primary production // *Remote Sensing of Environment*. 2022. V. 268. P.112748. DOI: 10.1016/j.rse.2021.112748.
30. Liu Z., Zhao F., Liu X. et al. Direct estimation of photosynthetic CO₂ assimilation from solar-induced chlorophyll fluorescence (SIF)// *Remote Sensing of Environment*. 2022. V. 271. 112893. DOI: 10.1016/j.rse.2022.112893.
31. Lungu O.N., Chabala L.M., Shepande C. Satellite-based crop monitoring and yield estimation—a review// *Journal of Agricultural Science*. 2020. V.13. P.180. DOI: 10.5539/jas.v13n1p180.

32. Magney T.S., Bowling D. R., Logan B. A. Mechanistic evidence for tracking the seasonality of photosynthesis with solar-induced fluorescence// PNAS. 2019. V. 116. no. 24. DOI: 10.1073/pnas.1900278116.
33. Marshall M., Tu K., Brown J. Optimizing a remote sensing production efficiency model for macro-scale GPP and yield estimation in agroecosystems // Remote Sensing of Environment. 2018. V. 217. P. 258-271. DOI: 10.1016/j.rse.2018.08.001.
34. Mordvin E.Y., Pochemin N.M., Volkov N.V. et al. Changes in Moisture Supply in the Steppe Zone of the Southern Part of Western Siberia for the Period 1980–2050 According to Scenario Forecasts Based on Global CMIP6 Models // Arid Ecosyst. 2024. V. 14, P. 259–268. DOI: 10.1134/S2079096124700203.
35. Muñoz-Sabater J., Dutra E., Agustí-Panareda A. et al. ERA5-Land: a state-of-the-art global reanalysis dataset for land applications// Earth Syst. Sci. Data. 2021. V.13: Pp. 4349-4383. DOI: 10.5194/essd-13-4349-2021.
36. Oshio H., Yoshida Y., Matsunaga T. On the zero-level offset in the GOSAT TANSO-FTS O₂A band and the quality of solar-induced chlorophyll fluorescence (SIF): comparison of SIF between GOSAT and OCO-2 // Atmos. Meas. Tech. 2019. V.12. 6721–6735.
37. Peng B., Guan K., Pan M., Li Y. Benefits of Seasonal Climate Prediction and Satellite Data for Forecasting U.S. Maize Yield// Geophysical Research Letters. 2018. V. 45. DOI: 10.1029/2018GL079291.
38. Proctor J., Zeppetello L.V., Chan D. et al. Climate change increases the interannual variance of summer crop yields globally through changes in temperature and water supply// Science Advances. 2025. V.11. P. 3575. DOI: 10.1126/sciadv.ady3575.
39. Reeves M.C., Zhao M., Running, S.W. Usefulness and limits of MODIS GPP for estimating wheat yield.// International Journal of Remote Sensing. 2005. V.26. Pp.1403–1421. DOI:10.1080/01431160512331326567.
40. Rouse J. W., Haas R. H., Schell J. A. et al. Monitoring vegetation systems in the Great Plains with ERTS. Third ERTS-1 Symposium. NASA SP-351. 1974. Pp. 309-317.
41. Running S.W., Nemani R.R., Heinsch F.A. et al. A Continuous Satellite-Derived Measure of Global Terrestrial Primary Production // BioScience. 2004. V. 54. Pp. 547–560. DOI: 10.1641/0006-3568(2004)054[0547:ACSMOG]2.0.CO;2
42. Salomonson V. V., Barnes W. L., Maymon P. W. et al. MODIS: advanced facility instrument for studies of the Earth as a system // Transactions on Geoscience and Remote Sensing. 1989. V. 27. No. 2. Pp. 145-153. DOI: 10.1109/36.20292.
43. Tanaka T., Sun L., Becker-Reshef I. et al. Satellite forecasting of crop harvest can trigger a cross-hemispheric production response and improve global food security// Communications Earth & Environment. 2023. V.4. DOI: 10.1038/s43247-023-00992-2.
44. Tucker C.J. Red and photographic infrared linear combinations for monitoring vegetation. // Remote Sens Environ. 1979. V. 8. Pp.127–150.
45. Tucker C.J., Fung I.Y., Keeling C. D. et al. Relationship between atmospheric CO₂ variations and a satellite-derived vegetation index// NATURE. 1986. V. 319. C. 195–199.
46. Veefkind J. P., Aben I., McMullan K. et al. TROPOMI on the ESA Sentinel-5 Precursor: a GMES mission for Global Observations of the Atmospheric Composition

for Climate, Air Quality and Ozone Layer Applications // Remote Sensing of Environment. 2012. V. 120. Pp. 70–83.

47. Xiao J., Fisher J.B., Hashimoto H. et al. Emerging satellite observations for diurnal cycling of ecosystem processes// Nat. Plant. 2021. no.7. C. 877–887.

Forecast of the yield of spring grain crops for the south of Western Siberia based on fluorescent radiation flows

A. E. Karamzina, E. Yu. Mordvin, A. A. Lagutin

Altai State University, Barnaul, 656049, Russia

E-mail: alena.karamzina@alt22.ru

This work discusses a model linking the yield of spring cereals and legumes crops in the south of West Siberia with fluorescent emission fluxes, which are emitted in the 600–800 nm range and represent a byproduct of the light phase of photosynthesis. The primary source of information on fluorescent emission fluxes is the TROPOMI spectrometer, installed onboard the Sentinel-5 Precursor satellite. The developed methodology combines fluorescence data with information on sown area distribution (MCD12Q1/MODIS satellite product) and official Rosstat yield data. The key hypothesis is based on a linear relationship between regional fluorescent emission levels and gross primary production, which determines the biomass formation process of grain and legume crops. Analysis of TROPOMI data for the period 2020–2024 revealed a stable correlational between fluorescence maxima and yield indicators. It was found that incorporating a loss function into the model, based on the Selyaninov hydrothermal coefficient P for the August–September period, allowed for a better agreement between the maximum fluorescent emission and the specific yield obtained from Rosstat data. The estimation of P was performed using results from the SEAS5 sub-seasonal climate model, corrected using the Empirical Quantile Mapping (EQM). For yield forecasting in the Novosibirsk, Omsk, Kemerovo regions, and Altai Krai, the coefficient of determination R^2 was 0.17, 0.79, 0.53, and 0.90, respectively, for the case without accounting for losses, and 0.89, 0.88, 0.86, and 0.97, respectively, for the model with losses. The research results confirm the promise of using fluorescent radiation information for monitoring and forecasting the yield of spring agricultural crops in areas with risky farming.

Keywords: SIF, GPP, chlorophyll fluorescence, photosynthesis, yield, Sentinel-5 Precursor, TROPOMI, Remote Sensing, SEAS5, south of Western Siberia.

References

1. Amirova T.N. Impact of Moisture Loss on Crop Yields during Irrigation Using the Pivot Center Irrigation Method // Land Reclamation and Water Management. 2023. No. 2. P. 4–7. DOI 10.32962/0235-2524-2023-2-4-7.
2. Bezrukikh V. A., Avdeeva E. V., Ivanov D. V., et al. "Risky farming" or risks in agricultural nature management of the boreal zone of Yenisei Siberia // Conifers of the boreal zone. V. 42. No. 2. 2024. pp. 12–15.
3. Bereza O.V., Strashnaya A.I., Lupyan E.A. On the possibility of forecasting winter wheat yield in the Middle Volga region based on the integration of ground-based and satellite data// Modern problems of remote sensing of the Earth from space. 2015. V. 12. No. 1. P. 18–30.
4. Eroshenko F. V., Bartalev S. A., Storchak I. G. et. al. Possibilities of remote assessment of winter wheat yield based on the vegetation index of photosynthetic potential. Modern problems of remote sensing of the Earth from space. 2016. V. 13. No. 4. P. 99–112.
5. Illarionova L.V., Stepanov A.S., Prokhorets I.O. Approximation of NDVI time series by nonlinear functions for monitoring agricultural crops in the Far East // Proceedings of

- the 21st International Conference "Modern Problems of Remote Sensing of the Earth from Space". 2023.
6. *Kelchevskaya, L. S.* Methods of processing observations in agroclimatology. L.: Gidrometeizdat. 1971. 215 p. <http://mgmtmo.ru/edumat/agro/kelchevskaya.pdf>
7. *Lupyan E.A., Bartalev S.A., Krashenninnikova Yu.S. et al.* Abnormal development of spring crops in the regions of the European part of Russia in 2017 // Modern problems of remote sensing of the Earth from space. 2017. V. 14. No. 3. P. 324–329.
8. *Simonenko E. I.* Influence of the climatic factor on yield losses of grain crops // Colloquium-Journal. 2019. No. 22-7 (46). P. 26-27.
9. *Spiridonov Yu. Ya., Budynkov N. I., Azizov Z. M. et al.* The impact of integrated weed control measures on the yield and quality of winter wheat // Vavilov Readings - 2019: International scientific and practical conference dedicated to the 132nd anniversary of the birth of Academician N.I. Vavilov. Saratov. 2019. pp. 228-230.
10. *Fedolov, Yu. P.* Photosynthesis and respiration of plants: a tutorial for bachelors studying the discipline "Plant Physiology and Biochemistry" // Kuban State Agrarian University named after I.T. Trubilin. 2019. 101 p.
11. *Schmidt I. V., Latypova A. M., Tsarenko A. L.* Application of Earth remote sensing data for forecasting crop yields // Regional Geosystems. 2022. V. 46. No. 4. DOI: 10.52575/2712-7443-2022-46-4-539-554.
12. *Shokin Yu.I., Lagutin A.A., Mordvin E.Yu., et al.* Technology for estimating gross primary production based on satellite observation data// Computational technologies. 2023. V. 28. No. 2. Pp. 103–114. DOI: 10.25743/ICT.2023.28.2.009
13. *Shtirbet A., Riznichenko G., Rubin A., et al.* Modeling the kinetics of chlorophyll a fluorescence: relationship with photosynthesis (review) // Biochemistry. 2014. V. 79. No. 4. P. 379-412.
14. *Ayudhya T., Posey F. T., Tyus J. C. et al.* Using a Microscale Approach To Rapidly Separate and Characterize Three Photosynthetic Pigment Species from Fern // Journal of Chemical Education. 2015. V. 92. Issue 5. DOI:10.1021/ed500344c.
15. *Berger M., Moreno J., Johannessen J. A. et al.* ESA's sentinel missions in support of Earth system science // Remote Sensing of Environment. 2012. V.120. Pp. 84-90. DOI: 10.1016/j.rse.2011.07.023.
16. *Bi Y., Wang Q., Yang Z. et al.* TanSat ACGS on-orbit spectral calibration by use of individual solar lines and entire atmospheric spectra // Atmos. Meas. Tech. Discuss. [preprint]. 2020. DOI: 10.5194/amt-2020-20.
17. *Butz A., Galli A., Hasekamp O. et al.* TROPOMI aboard Sentinel-5 Precursor: Prospective performance of CH₄ retrievals for aerosol and cirrus loaded atmospheres // Remote Sensing of Environment. 2012. V. 120. Pp. 267-276. DOI: 10.1016/j.rse.2011.05.030.
18. *Cannon A.J., Sobie S.R., Murdock T.Q.* Bias Correction of GCM Precipitation by Quantile Mapping: How Well Do Methods Preserve Changes in Quantiles and Extremes?// Journal of Climate. 2015. V.28. Pp. 6938–6959. DOI: 10.1175/JCLI-D-14-00754.1
19. *Doughty R., Kurosui T. P., Parazoo N. et al.* Global GOSAT, OCO-2, and OCO-3 solar-induced chlorophyll fluorescence datasets // Supplement of Earth Syst. Sci. Data. 14. 2022. P. 1513–1529 DOI: 10.5194/essd-14-1513-2022-supplement.

20. *Elber G., Lee I.-K., Kim M.-S.* Comparing Offset Curve Approximation Methods // IEEE Computer Graphics and Applications. V. 17. No 3. Pp. 62-71. DOI: 10.1109/38.586019.
21. *Fang J., Li X., Xiao J. et al.* Vegetation photosynthetic phenology dataset in northern terrestrial ecosystems// Scientific Data. 2023. DOI: 10.1038/s41597-023-02224-w.
22. *Frankenberg C., Pollock R., Lee R.A.M. et al.* The Orbiting Carbon Observatory (OCO-2): spectrometer performance evaluation using pre-launch direct sun measurements // Atmospheric Measurement Techniques. 2015. V. 8. Pp. 301–313. DOI: 10.5194/amt-8-301-2015.
23. *Friedl M., Sulla-Menashe, D.* (2022). MODIS/Terra+Aqua Land Cover Type Yearly L3 Global 500m SIN Grid V061 [Data set]. NASA Land Processes Distributed Active Archive Center. DOI: 10.5067/MODIS/MCD12Q1.061 (Date Accessed: 2025-07-03)
24. *Friedl M.A., McIver D.K., Hodges J.C.F. et al.* Global land cover mapping from MODIS: algorithms and early results // Remote Sensing of Environment. 2002. V. 83. P. 287 – 302. DOI: 10.1016/S0034-4257(02)00078-0.
25. *Friedl M. A., Sulla-Menashe D., Tan B. et al.* MODIS Collection 5 global land cover: Algorithm refinements and characterization of new datasets // Remote Sensing of Environment. 2010. V.114. P. 168–182. DOI: 10.1016/j.rse.2009.08.016.
26. *Guanter L., Bacour C., Schneider A. et al.* The TROPISIF global suninduced fluorescence dataset from the Sentinel-5P TROPOMI mission// Earth Syst. Sci. Data. 2021. V.13. Issue 11. DOI:10.5194/essd-13-5423-2021.
27. *Hersbach H., Bell B., Berrisford P. et al.* The ERA5 global reanalysis. // Q J R Meteorol Soc. 2020. V. 146. Pp.1999–2049. DOI: 10.1002/qj.3803.
28. *Johnson S. J., Stockdale T.N., Ferranti L. et al.* SEAS5: the new ECMWF seasonal forecast system // Geoscientific Model Development. 2019. V. 12(3). Pp. 1087-1117. DOI: 10.5194/gmd-12-1087-2019.
29. *Li X., Xiao J.* TROPOMI observations allow for robust exploration of the relationship between solar-induced chlorophyll fluorescence and terrestrial gross primary production // Remote Sensing of Environment. 2022. V. 268. P.112748. DOI: 10.1016/j.rse.2021.112748.
30. *Liu Z., Zhao F., Liu X. et al.* Direct estimation of photosynthetic CO2 assimilation from solar-induced chlorophyll fluorescence (SIF)// Remote Sensing of Environment. 2022. V. 271. 112893. DOI: 10.1016/j.rse.2022.112893.
31. *Lungu O.N., Chabala L.M., Shepande C.* Satellite-based crop monitoring and yield estimation—a review// Journal of Agricultural Science. 2020. V.13. P.180. DOI: 10.5539/jas.v13n1p180.
32. *Magney T.S., Bowlingc D. R., Logan B. A.* Mechanistic evidence for tracking the seasonality of photosynthesis with solar-induced fluorescence// PNAS. 2019. V. 116. no. 24. DOI: 10.1073/pnas.1900278116.
33. *Marshall M., Tu K., Brown J.* Optimizing a remote sensing production efficiency model for macro-scale GPP and yield estimation in agroecosystems // Remote Sensing of Environment. 2018. V. 217. P. 258-271. DOI: 10.1016/j.rse.2018.08.001.
34. *Mordvin E.Y., Pochemin N.M., Volkov N.V. et al.* Changes in Moisture Supply in the Steppe Zone of the Southern Part of Western Siberia for the Period 1980–2050 According to Scenario Forecasts Based on Global CMIP6 Models // Arid Ecosyst. 2024. V. 14, P. 259–268. DOI: 10.1134/S2079096124700203.

35. Muñoz-Sabater J., Dutra E., Agustí-Panareda A. *et al.* ERA5-Land: a state-of-the-art global reanalysis dataset for land applications// *Earth Syst. Sci. Data*. 2021. V.13: Pp. 4349-4383. DOI: 10.5194/essd-13-4349-2021.
36. Oshio H., Yoshida Y., Matsunaga T. On the zero-level offset in the GOSAT TANSO-FTS O₂ A band and the quality of solar-induced chlorophyll fluorescence (SIF): comparison of SIF between GOSAT and OCO-2 // *Atmos. Meas. Tech.* 2019. V.12. 6721–6735.
37. Peng B., Guan K., Pan M., Li Y. Benefits of Seasonal Climate Prediction and Satellite Data for Forecasting U.S. Maize Yield// *Geophysical Research Letters*. 2018. V. 45. DOI: 10.1029/2018GL079291.
38. Proctor J., Zeppetello L.V., Chan D. *et al.* Climate change increases the interannual variance of summer crop yields globally through changes in temperature and water supply// *Science Advances*. 2025. V.11. P. 3575. DOI: 10.1126/sciadv.ady3575.
39. Reeves M.C., Zhao M., Running, S.W. Usefulness and limits of MODIS GPP for estimating wheat yield.// *International Journal of Remote Sensing*. 2005. V.26. Pp.1403–1421. DOI:10.1080/01431160512331326567.
40. Rouse J. W., Haas R. H., Schell J. A. *et al.* Monitoring vegetation systems in the Great Plains with ERTS. Third ERTS-1 Symposium. NASA SP-351. 1974. Pp. 309-317.
41. Running S.W., Nemani R.R., Heinsch F.A. *et al.* A Continuous Satellite-Derived Measure of Global Terrestrial Primary Production // *BioScience*. 2004. V. 54. Pp. 547–560. DOI: 10.1641/0006-3568(2004)054[0547:ACSMOG]2.0.CO;2.
42. Salomonson V. V., Barnes W. L., Maymon P. W. *et al.* MODIS: advanced facility instrument for studies of the Earth as a system // *Transactions on Geoscience and Remote Sensing*. 1989. V. 27. No. 2. Pp. 145-153. DOI: 10.1109/36.20292.
43. Tanaka T., Sun L., Becker-Reshef I. *et al.* Satellite forecasting of crop harvest can trigger a cross-hemispheric production response and improve global food security// *Communications Earth & Environment*. 2023. V.4. DOI: 10.1038/s43247-023-00992-2.
44. Tucker C.J. Red and photographic infrared linear combinations for monitoring vegetation. // *Remote Sens Environ.* 1979. V. 8. Pp.127–150.
45. Tucker C.J., Fung I.Y., Keeling C. D. *et al.* Relationship between atmospheric CO₂ variations and a satellite-derived vegetation index// *NATURE*. 1986. V. 319. C. 195–199.
46. Veefkind J. P., Aben I., McMullan K. *et al.* TROPOMI on the ESA Sentinel-5 Precursor: a GMES mission for Global Observations of the Atmospheric Composition for Climate, Air Quality and Ozone Layer Applications // *Remote Sensing of Environment*. 2012. V. 120. Pp. 70–83.
47. Xiao J., Fisher J.B., Hashimoto H. *et al.* Emerging satellite observations for diurnal cycling of ecosystem processes// *Nat. Plant*. 2021. no.7. C. 877–887.