

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

3
4 **А. Е. Карамзина, Е. Ю. Мордин, А. А. Лагутин**

5
6 *Алтайский государственный университет, Барнаул, 656049, Россия*
7 *E-mail: alena.karamzina@alt22.ru*

8
9 В работе обсуждается модель, связывающая урожайность яровых зерновых и зернобобовых культур юга
10 Западной Сибири с потоками флуоресцентного излучения, которые испускаются в диапазоне 600–800 нм и
11 представляют собой побочный продукт световой фазы фотосинтеза. Основным источником информации о
12 потоках флуоресцентного излучения служит спектрометр TROPOMI, установленный на спутнике Sentinel-5
13 Precursor. Разработанная методология объединяет данные о флуоресцентном излучении с информацией о
14 распределении посевных площадей (спутниковый продукт MCD12Q1/MODIS) и официальными данными
15 Росстата по урожайности. Ключевая гипотеза основывается на линейной зависимости между региональными
16 уровнями флуоресцентного излучения и валовой первичной продукцией, определяющими процесс
17 формирования биомассы зерновых и зернобобовых культур. Проведенный анализ данных TROPOMI за
18 период 2020–2024 годов выявил устойчивую корреляционную связь между максимумами значений
19 флуоресценции и показателями урожайности. Установлено, что включение в модель функции потерь, которая
20 опирается на гидротермический коэффициент Селянинова P для периода август–сентябрь, позволило лучшим
21 образом согласовать максимум флуоресцентного излучения и удельную урожайность, полученную по данным
22 Росстата. Оценка P выполнялась с использованием результатов субсезонной климатической модели SEAS5,
23 скорректированных методом EQM. Для прогноза урожайности в Новосибирской, Омской, Кемеровской
24 областях и Алтайском крае коэффициент детерминации R^2 для случая без учета потерь равен 0,17, 0,79, 0,53,
25 0,90, а для модели с потерями – 0,89, 0,88, 0,86, 0,97, соответственно. Результаты исследования подтверждают
26 перспективность использования информации о флуоресцентном излучении для мониторинга и
27 прогнозирования урожайности яровых сельскохозяйственных культур в зонах рискованного земледелия.

28
29 **Ключевые слова:** SIF, GPP, флуоресценция хлорофилла, фотосинтез, урожайность, Sentinel-5 Precursor,
30 TROPOMI, ДЗЗ, SEAS5, юг Западной Сибири

31
32 **Введение**

33
34
35 Наблюдаемое изменение климата оказывает значительное воздействие на
36 стабильность урожайности сельскохозяйственных культур, увеличивая показатели
37 дисперсии и обостряя проблему неопределенности рисков в агропромышленном секторе
38 (Proctor et al., 2025). В наибольшей степени это отражается на территориях рискованного
39 земледелия, которым свойственны существенные аномалии приземной температуры
40 воздуха и увлажненности почвы. Это создаёт дополнительные финансовые риски для
41 сельхозпроизводителей, влияет на внутренний рынок продуктов питания, экспортные
42 возможности и может приводить к ухудшению продовольственной безопасности для
43 регионов с ограниченным запасом ресурсов (Tanaka et al., 2023).

44
45 Характерным представителем таких территорий является юг Западной Сибири —
46 регион с развитым агропромышленным комплексом, где основная часть
47 сельскохозяйственных угодий отведена под зерновые и кормовые культуры. Территория
48 классифицируется как зона рискованного земледелия (Безруких и др., 2024), что требует
49 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 ($gr/(m^2 \cdot \text{день})$).

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).

85

86

87

88

89

Приборы и методы

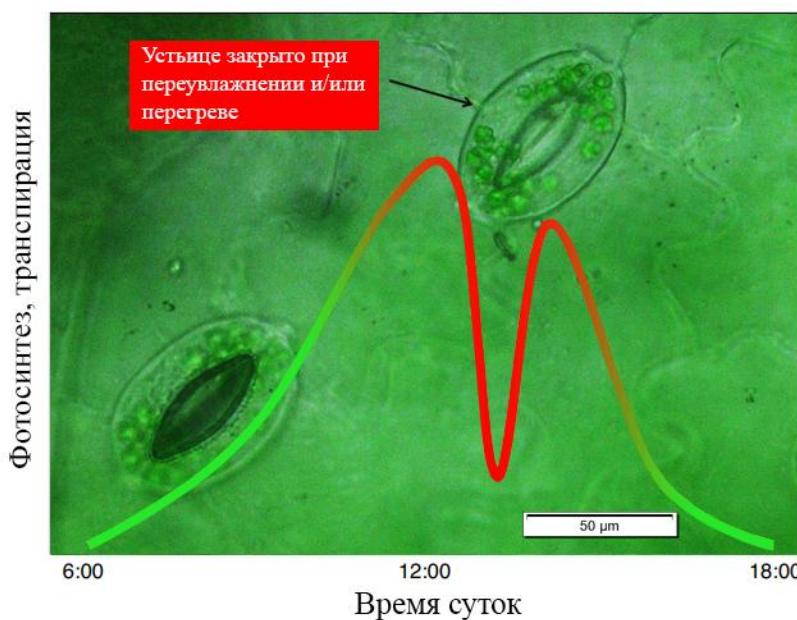
90

Связь флуоресценции хлорофилла и GPP

91

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).

104



105

106

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

107

108

109

110

111

112

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

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

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

127

128

129

Спектрорадиометр MODIS

130

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

139 Продукт MCD12Q1 (Friedl, Sulla-Menashe, 2022) представляет собой результаты
140 совместной обработки наблюдений приборов MODIS, установленных на спутниках Terra и
141 Aqua. Он содержит наборы данных, которые отображают информацию о типах
142 подстилающей поверхности Земли с пространственным разрешением 500 метров. Данный
143 продукт создан на основе классификаций спектрально–временных характеристик,
144 полученных с использованием измерений спектрорадиометров MODIS в течение одного
145 года. Используемый алгоритм выполняет классификацию объектов, опираясь на годовые
146 сигнатуры коэффициентов спектральной яркости поверхности (см. например, Friedl et al.,
147 2002, 2010). В результате выделяются различные типы подстилающей поверхности, такие
148 как лесные массивы (лиственные/хвойные), кустарники, травянистая растительность,

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

152

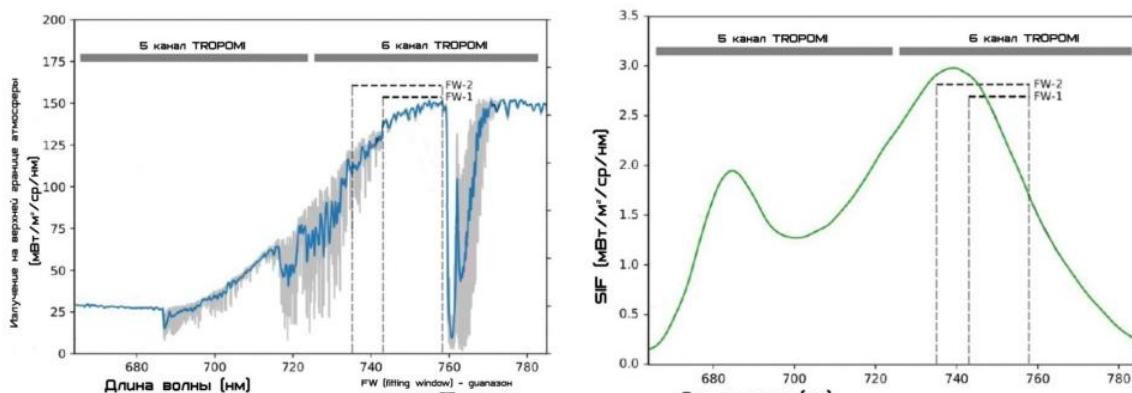
153

154 *Спектрометр TROPOMI/S5P*

155

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

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



173

174 а)

б)

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

178

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

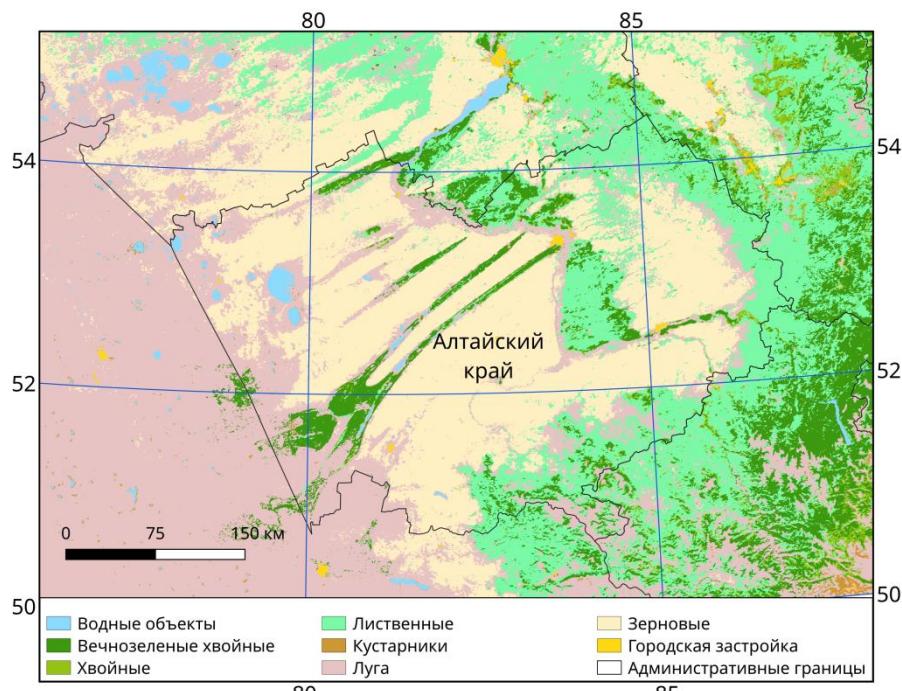
183

184

185 Результаты

186

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



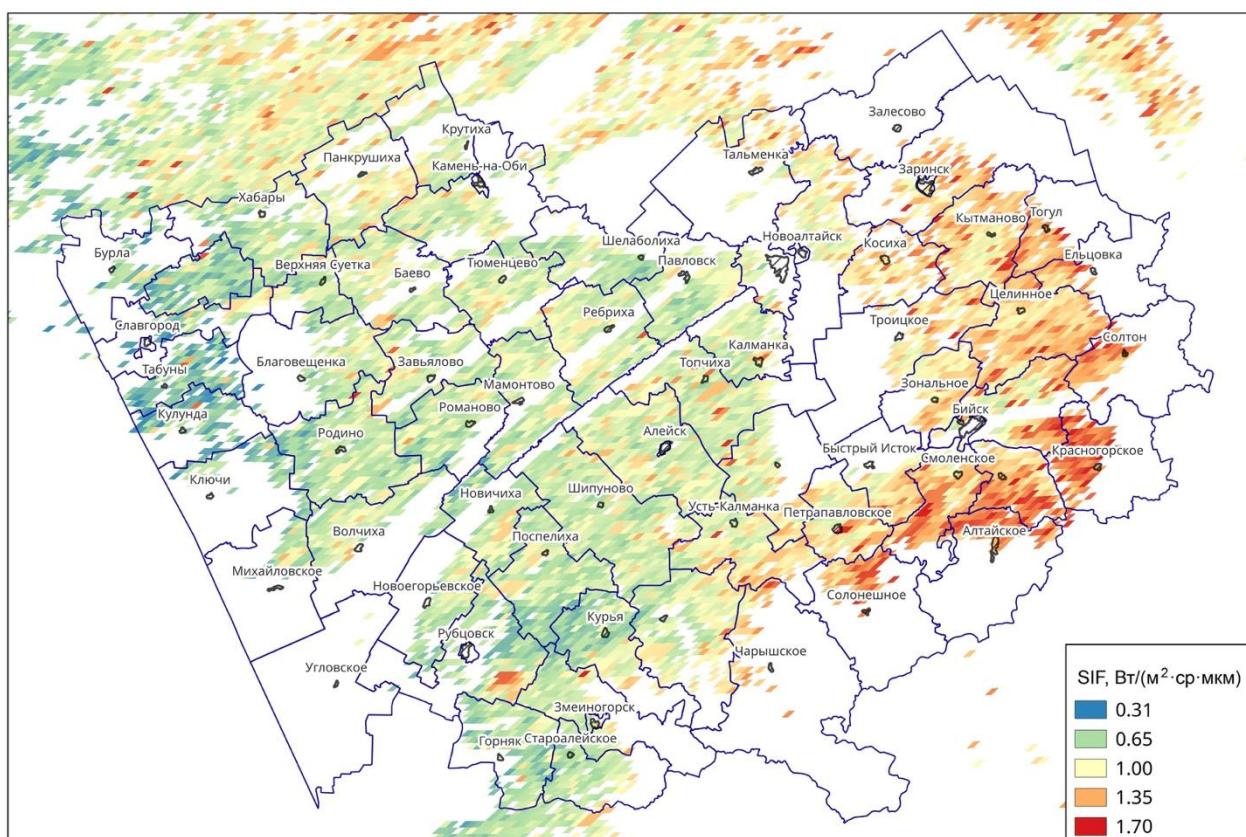
196

197 *Рис. 3. Классификация типов подстилающей поверхности по данным продукта*
198 *MCD12Q1 (Friedl, Sulla-Menashe, 2022) за 2020 год для территории Алтайского края*
199

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

204 для маскирования данных о SIF_Corr на длине волны 743 нм (далее SIF), полученных с
205 помощью алгоритма TROPOSIF. Данная процедура применялась для каждого снимка
206 TROPOMI. Таким образом, была создана база наблюдений SIF для с.-х. земель
207 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.

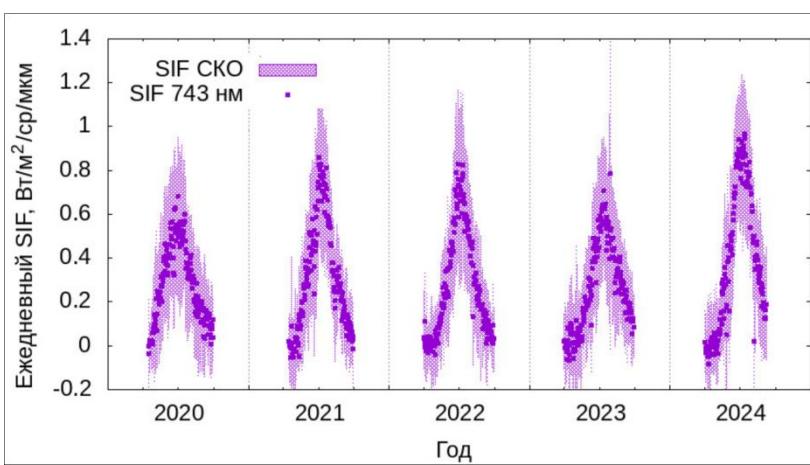


220 Рис. 4. Максимум в наблюдениях SIF для пахотных земель Алтайского края по данным S5P
221 за период июнь–июль 2020 года

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

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

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



242

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

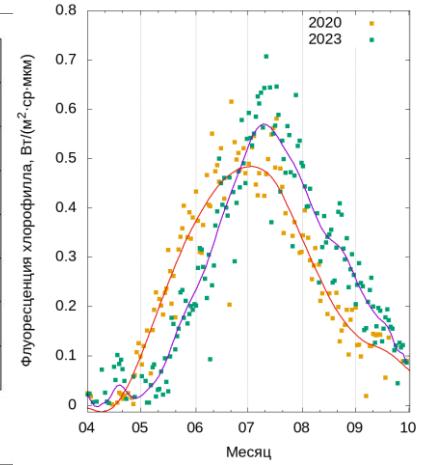


Рис. 5.б Сезонный ход SIF для земель с/х назначения Алтайского края в 2020 и 2023

243

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

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

255

256

257 *Связь урожайности и SIF*

258

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

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

$$269 \quad W = M/S \quad . \quad (1)$$

270 Здесь M – фактическая урожайность (в млн. тонн); S – обрабатываемая площадь (в млн.га).

271 Для перехода от SIF_{max} к удельной урожайности W был найден коэффициент C согласно
272 следующему выражению:

$$273 \quad W = C \times SIF_{max}. \quad (2)$$

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

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

$$283 \quad W = \tilde{W}(1 - l). \quad (3)$$

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

286 кампании (август-сентябрь), которая приводит к затруднениям в механизированной
287 обработке. В силу этого в работе предлагается выразить функцию потерь l через
288 гидротермический коэффициент Селянинова P (см/ $^{\circ}$ С) для периода август-сентябрь

289

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

290 где t – пороговое значение P , при котором возможны потери, ε ($^{\circ}$ С/см) – масштабирующий
291 множитель.

292 Согласно (Кельчевская, 1971), гидротермический коэффициент определяется как

293

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

294 где R_n – суммарное суточное количество осадков (мм) для дня n , T_n – среднесуточная
295 температура приземного слоя воздуха ($^{\circ}$ С). Суммирование выполняется при условии $T >$
296 T_k , где T_k – пороговое значение температуры, которое зависит от с.-х. культуры.
297 Общепринятым значением является $T_k = +10$ $^{\circ}$ С,

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

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

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

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

326 Таким образом, в отсутствии информации о P , предварительный прогноз
327 урожайности может быть сформирован с использованием коэффициента $C1$ во второй
328 половине июля. Однако в условиях высокой увлажненности в августе-сентябре ($P > 0.75$)
329 ошибка прогноза может достигать 25%, что, например, наблюдается в 2024 году.
330

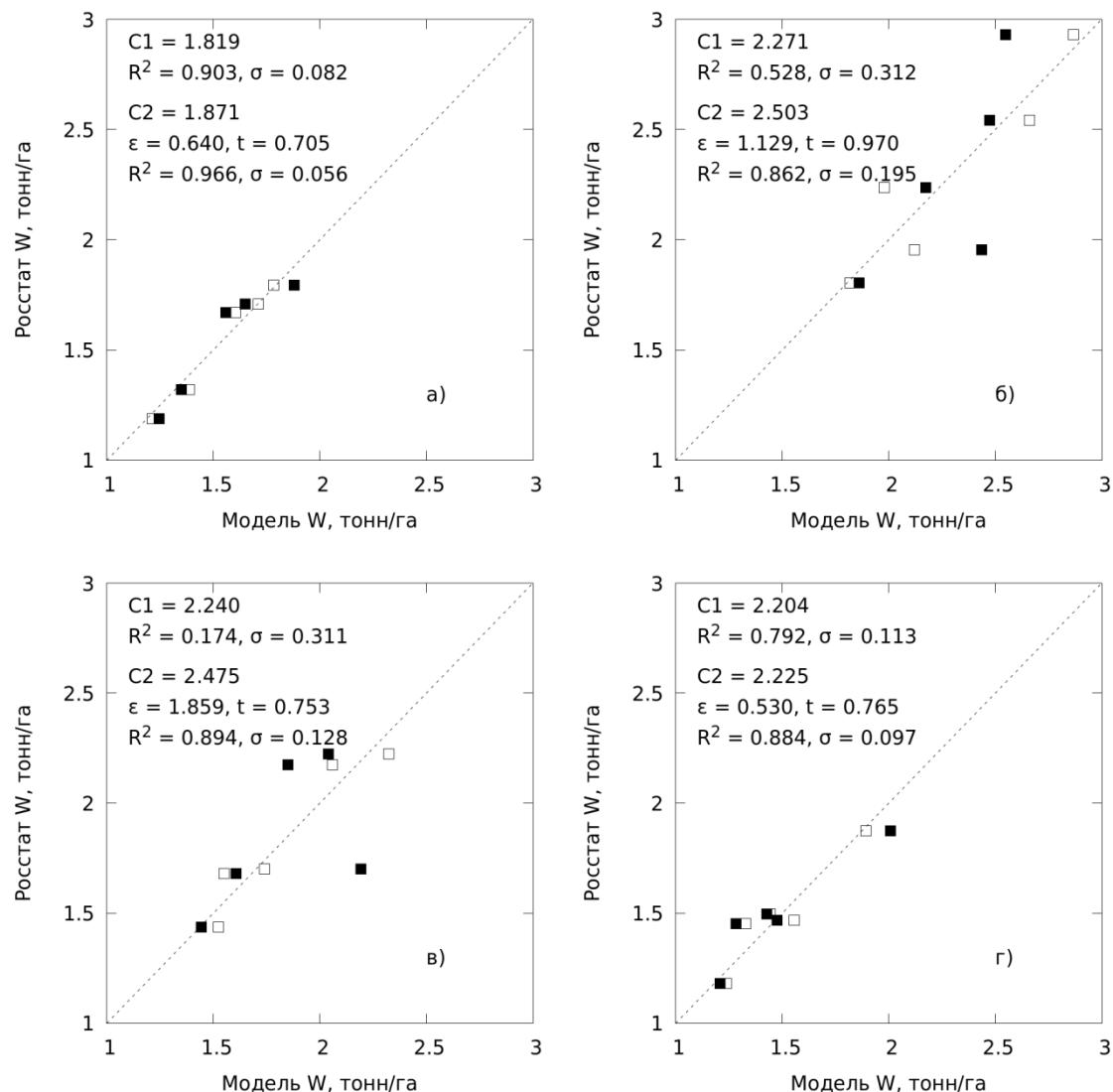
331 *Таблица 1.* Компоненты модели связывающей урожайность яровых зерновых и
332 зернобобовых культур юга Западной Сибири с потоками флуоресцентного излучения

Регион	Год	SIF_{max} , Вт/(м ² · сп · 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-5 Precursor и P для 4-х регионов юга Западной Сибири в 2020–2024 гг.: а – Алтайский край,*
 338 *б – Кемеровская область, в – Новосибирская область, г – Омская область*

340

341 Следует отметить несколько ограничений, которые могут повлиять на точность
 342 обсуждаемой модели. Во-первых, предполагается наличие неточностей в данных Росстата,
 343 вызванных различными факторами. С другой стороны, оценки SIF_{max} , полученные с
 344 использованием наблюдений TROPOMI, имеют значительную погрешность (~25%) и
 345 грубое пространственное разрешение 5.5×3.5 км, что также негативно сказывается на
 346 точности модели. В-третьих, большая площадь исследуемых регионов затрудняет учет
 347 локальных климатических и технологических особенностей. Кроме того, предложенная
 348 модель не отделяет полезную биомассу от сопутствующей сорной растительности. Учет

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

351 **Заключение.** В работе предложена модель, связывающая урожайность яровых
352 зерновых и зернобобовых культур юга Западной Сибири с потоками флуоресцентного
353 излучения, регистрируемыми спектрометром TROPOMI/Sentinel–5 Precursor. Установлена
354 устойчивая корреляционная связь между максимумом в спутниковых наблюдениях
355 флуоресцентного излучения и урожайностью зерновых и зернобобовых культур для
356 периода 2020–2024 гг. Показано, что включение в модель функции потерь, основанной на
357 гидротермическом коэффициенте Селянинова P для периода август–сентябрь, позволяет
358 более точно согласовать максимальное значение флуоресценции и удельную урожайность,
359 полученную по данным Росстата. Оценка P выполнялась с использованием результатов
360 субсезонной климатической модели SEAS5, скорректированных методом EQM. Фактор
361 увлажненности в августе–сентябре, при котором неизбежны потери, следует учитывать для
362 $P > 0.75$. Показано, что для прогноза урожайности в Новосибирской, Омской,
363 Кемеровской областях и Алтайском крае коэффициент детерминации R^2 для случая без
364 учета потерь составляет 0,17, 0,79, 0,53, 0,90, тогда как в модели с учетом потерь он равен
365 0,89, 0,88, 0,86, 0,97. Следующий этап предполагает работу с другими методами коррекции
366 данных SEAS5 с целью улучшения точности долгосрочного прогнозирования
367 метеорологических условий.

368

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

372

373

374

Литература

375

376

1. Амирова Т. Н. Влияние потерь влаги на урожайность при
377 ирригационных работах по методу кругового центра орошения // Мелиорация и
378 водное хозяйство. 2023. № 2. С. 4-7. DOI 10.32962/0235-2524-2023-2-4-7.

379

380

2. Безруких В. А., Авдеева Е. В., Иванов Д. В. и др. «Рискованное
381 земледелие» или риски в аграрном природопользовании бореальной зоны
Приенисейской Сибири // Хвойные бореальные зоны. Т.42. № 2. 2024. с.12-15.

382

383

3. Береза О.В., Страшная А.И., Лупян Е.А. О возможности
384 прогнозирования урожайности озимой пшеницы в Среднем Поволжье на основе
385 комплексирования наземных и спутниковых данных// Современные проблемы
386 дистанционного зондирования Земли из космоса. 2015. Т. 12. № 1. С. 18-30.

387

4. Ерошенко Ф.В., Барталев С.А., Сторчак И.Г. и Плотников Д.Е.
Возможности дистанционной оценки урожайности озимой пшеницы на основе

- 388 вегетационного индекса фотосинтетического потенциала. Современные проблемы
389 дистанционного зондирования Земли из космоса. 2016. Т. 13. № 4. С. 99–112.
- 390 5. Илларионова Л.В., Степанов А.С., Прохорец И.О. Аппроксимация
391 временных рядов NDVI нелинейными функциями для мониторинга сельхозкультур
392 Дальнего Востока// Материалы 21-й Международной конференции «Современные
393 проблемы дистанционного зондирования Земли из космоса». 2023.
- 394 6. Кельчевская Л.С. Методы обработки наблюдений в агроклиматологии.
395 Л.: Гидрометеоидат. 1971. 215 с. <http://mgmtmo.ru/edumat/agro/kelchevskaya.pdf>
- 396 7. Лупян Е.А., Барталев С.А., Крашенинникова Ю.С. и др. Аномальное
397 развитие яровых культур в регионах европейской части России в 2017 году //
398 Современные проблемы дистанционного зондирования Земли из космоса. 2017. Т.
399 14. № 3. С. 324–329.
- 400 8. Симоненко Е. И. Влияние климатического фактора на потери
401 урожайности зерновых культур // Colloquium-Journal. 2019. № 22-7(46). С. 26-27.
- 402 9. Спиридонов Ю.Я., Будынков Н.И., Азизов З.М. и др. Влияние
403 комплексных мер борьбы с сорняками на урожайность и качество озимой пшеницы
404 // Вавиловские чтения - 2019: Международная научно-практическая конференция,
405 посвященной 132-ой годовщине со дня рождения академика Н.И. Вавилова. Саратов.
406 2019. с. 228-230.
- 407 10. Федулов, Ю. П. Фотосинтез и дыхание растений: учебное пособие для
408 бакалавров, изучающих дисциплину «Физиология и биохимия растений»//
409 Кубанский государственный аграрный университет им. И.Т. Трубилина. 2019. 101 с.
- 410 11. Шмидт И.В., Латыпова А.М., Царенко А.Л. Применение данных
411 дистанционного зондирования Земли для прогнозирования урожайности
412 сельскохозяйственных культур// Региональные геосистемы. 2022. Т. 46. №4. DOI:
413 10.52575/2712-7443-2022-46-4-539-554.
- 414 12. Шокин Ю.И., Лагутин А.А., Мордвин Е.Ю. и др. Технология оценки
415 валовой первичной продукции по данным спутниковых наблюдений//
416 Вычислительные технологии. 2023. Т. 28. №2. С.103–114.
417 DOI:10.25743/ICT.2023.28.2.009
- 418 13. Штирбет А., Ризниченко Г., Рубин А. и др. Моделирование кинетики
419 флуоресценции хлорофилла а: связь с фотосинтезом (обзор) // Биохимия. 2014. Т. 79.
420 № 4. С. 379-412.
- 421 14. Ayudhya T., Posey F. T., Tyus J. C. et al. Using a Microscale Approach To
422 Rapidly Separate and Characterize Three Photosynthetic Pigment Species from Fern //
423 Journal of Chemical Education. 2015. V. 92. Issue 5. DOI:10.1021/ed500344c.
- 424 15. Berger M., Moreno J., Johannessen J. A. et al. ESA's sentinel missions in
425 support of Earth system science // Remote Sensing of Environment. 2012. V.120. Pp. 84-
426 90. DOI: 10.1016/j.rse.2011.07.023.
- 427 16. Bi Y., Wang Q., Yang Z. et al. TanSat ACSS on-orbit spectral calibration
428 by use of individual solar lines and entire atmospheric spectra // Atmos. Meas. Tech.
429 Discuss. [preprint]. 2020. DOI: 10.5194/amt-2020-20.
- 430 17. Butz A., Galli A., Hasekamp O. et al. TROPOMI aboard Sentinel-5
431 Precursor: Prospective performance of CH₄ retrievals for aerosol and cirrus loaded
432 atmospheres // Remote Sensing of Environment. 2012. V. 120. Pp. 267-276. DOI:
433 10.1016/j.rse.2011.05.030.

- 434 18. *Cannon A.J., Sobie S.R., Murdock T.Q.* Bias Correction of GCM
435 Precipitation by Quantile Mapping: How Well Do Methods Preserve Changes in Quantiles
436 and Extremes?// *Journal of Climate*. 2015. V.28. Pp. 6938–6959. DOI: 10.1175/JCLI-D-
437 14-00754.1.
- 438 19. *Doughty R., Kurosu T. P., Parazoo N. et al.* Global GOSAT, OCO-2, and
439 OCO-3 solar-induced chlorophyll fluorescence datasets // *Supplement of Earth Syst. Sci.*
440 *Data*. 14. 2022. P. 1513–1529 DOI: 10.5194/essd-14-1513-2022-supplement.
- 441 20. *Elber G., Lee I.-K., Kim M.-S.* Comparing Offset Curve Approximation
442 Methods // *IEEE Computer Graphics and Applications*. V. 17. No 3. Pp. 62-71. DOI:
443 10.1109/38.586019.
- 444 21. *Fang J., Li X., Xiao J. et al.* Vegetation photosynthetic phenology dataset
445 in northern terrestrial ecosystems// *Scientific Data*. 2023. DOI: 10.1038/s41597-023-
446 02224-w.
- 447 22. *Frankenberg C., Pollock R., Lee R.A.M. et al.* The Orbiting Carbon
448 Observatory (OCO-2): spectrometer performance evaluation using pre-launch direct sun
449 measurements // *Atmospheric Measurement Techniques*. 2015. V. 8. Pp. 301–313. DOI:
450 10.5194/amt-8-301-2015.
- 451 23. *Friedl M., Sulla-Menashe, D.* (2022). MODIS/Terra+Aqua Land Cover
452 Type Yearly L3 Global 500m SIN Grid V061 [Data set]. NASA Land Processes
453 Distributed Active Archive Center. DOI: 10.5067/MODIS/MCD12Q1.061 (Date
454 Accessed: 2025-07-03).
- 455 24. *Friedl M.A., McIver D.K., Hodges J.C.F. et al.* Global land cover mapping
456 from MODIS: algorithms and early results // *Remote Sensing of Environment*. 2002. V.
457 83. P. 287 – 302. DOI: 10.1016/S0034-4257(02)00078-0.
- 458 25. *Friedl M. A., Sulla-Menashe D., Tan B. et al.* MODIS Collection 5 global
459 land cover: Algorithm refinements and characterization of new datasets // *Remote Sensing*
460 of Environment. 2010. V.114. P. 168–182. DOI: 10.1016/j.rse.2009.08.016.
- 461 26. *Guanter L., Bacour C., Schneider A. et al.* The TROPOSIF global
462 suninduced fluorescence dataset from the Sentinel-5P TROPOMI mission// *Earth Syst. Sci.*
463 *Data*. 2021. V.13. Issue 11. DOI:10.5194/essd-13-5423-2021.
- 464 27. *Hersbach H., Bell B., Berrisford P. et al.* The ERA5 global reanalysis. // *Q*
465 *J R Meteorol Soc*. 2020. V. 146. Pp.1999–2049. DOI: 10.1002/qj.3803.
- 466 28. *Johnson S. J., Stockdale T.N., Ferranti L. et al.* SEAS5: the new ECMWF
467 seasonal forecast system // *Geoscientific Model Development*. 2019. V. 12(3). Pp. 1087-
468 1117. DOI: 10.5194/gmd-12-1087-2019.
- 469 29. *Li X., Xiao J.* TROPOMI observations allow for robust exploration of the
470 relationship between solar-induced chlorophyll fluorescence and terrestrial gross primary
471 production // *Remote Sensing of Environment*. 2022. V. 268. P.112748. DOI:
472 10.1016/j.rse.2021.112748.
- 473 30. *Liu Z., Zhao F., Liu X. et al.* Direct estimation of photosynthetic CO₂
474 assimilation from solar-induced chlorophyll fluorescence (SIF)// *Remote Sensing of*
475 *Environment*. 2022. V. 271. 112893. DOI: 10.1016/j.rse.2022.112893.
- 476 31. *Lungu O.N., Chabala L.M., Shepande C.* Satellite-based crop monitoring
477 and yield estimation—a review// *Journal of Agricultural Science*. 2020. V.13. P.180. DOI:
478 10.5539/jas.v13n1p180.

- 479 32. *Magney T.S., Bowlingc D. R., Logan B. A.* Mechanistic evidence for
480 tracking the seasonality of photosynthesis with solar-induced fluorescence// PNAS. 2019.
481 V. 116. no. 24. DOI: 10.1073/pnas.1900278116.
- 482 33. *Marshall M., Tu K., Brown J.* Optimizing a remote sensing production
483 efficiency model for macro-scale GPP and yield estimation in agroecosystems // Remote
484 Sensing of Environment. 2018. V. 217. P. 258-271. DOI: 10.1016/j.rse.2018.08.001.
- 485 34. *Mordvin E.Y., Pochevina N.M., Volkov N.V. et al.* Changes in Moisture
486 Supply in the Steppe Zone of the Southern Part of Western Siberia for the Period 1980–
487 2050 According to Scenario Forecasts Based on Global CMIP6 Models // Arid Ecosyst.
488 2024. V. 14, P. 259–268. DOI: 10.1134/S2079096124700203.
- 489 35. *Muñoz-Sabater J., Dutra E., Agustí-Panareda A. et al.* ERA5-Land: a state-
490 of-the-art global reanalysis dataset for land applications// Earth Syst. Sci. Data. 2021. V.13:
491 Pp. 4349-4383. DOI: 10.5194/essd-13-4349-2021.
- 492 36. *Oshio H., Yoshida Y., Matsunaga T.* On the zero-level offset in the GOSAT
493 TANSO-FTS O₂A band and the quality of solar-induced chlorophyll fluorescence (SIF):
494 comparison of SIF between GOSAT and OCO-2 // Atmos. Meas. Tech. 2019. V.12. 6721–
495 6735.
- 496 37. *Peng B., Guan K., Pan M., Li Y.* Benefits of Seasonal Climate Prediction
497 and Satellite Data for Forecasting U.S. Maize Yield// Geophysical Research Letters. 2018.
498 V. 45. DOI: 10.1029/2018GL079291.
- 499 38. *Proctor J., Zeppetello L.V., Chan D. et al.* Climate change increases the
500 interannual variance of summer crop yields globally through changes in temperature and
501 water supply// Science Advances. 2025. V.11. P. 3575. DOI: 10.1126/sciadv.ady3575.
- 502 39. *Reeves M.C., Zhao M., Running, S.W.* Usefulness and limits of MODIS GPP
503 for estimating wheat yield// International Journal of Remote Sensing. 2005. V.26.
504 Pp.1403–1421. DOI:10.1080/01431160512331326567.
- 505 40. *Rouse J. W., Haas R. H., Schell J. A. et al.* Monitoring vegetation systems
506 in the Great Plains with ERTS. Third ERTS-1 Symposium. NASA SP-351. 1974. Pp. 309-
507 317.
- 508 41. *Running S.W., Nemani R.R., Heinsch F.A. et al.* A Continuous Satellite-
509 Derived Measure of Global Terrestrial Primary Production // BioScience. 2004. V. 54. Pp.
510 547–560. DOI: 10.1641/0006-3568(2004)054[0547:ACSMOG]2.0.CO;2
- 511 42. *Salomonson V. V., Barnes W. L., Maymon P. W. et al.* MODIS: advanced
512 facility instrument for studies of the Earth as a system // Transactions on Geoscience and
513 Remote Sensing. 1989. V. 27. No. 2. Pp. 145-153. DOI: 10.1109/36.20292.
- 514 43. *Tanaka T., Sun L., Becker-Reshef I. et al.* Satellite forecasting of crop
515 harvest can trigger a cross-hemispheric production response and improve global food
516 security// Communications Earth & Environment. 2023. V.4. DOI: 10.1038/s43247-023-
517 00992-2.
- 518 44. *Tucker C.J.* Red and photographic infrared linear combinations for
519 monitoring vegetation. // Remote Sens Environ. 1979. V. 8. Pp.127–150.
- 520 45. *Tucker C.J., Fung I.Y., Keeling C. D. et al.* Relationship between
521 atmospheric CO₂ variations and a satellite-derived vegetation index// NATURE. 1986. V.
522 319. C. 195–199.
- 523 46. *Veefkind J. P., Aben I., McMullan K. et al.* TROPOMI on the ESA Sentinel-
524 5 Precursor: a GMES mission for Global Observations of the Atmospheric Composition

525 for Climate, Air Quality and Ozone Layer Applications // Remote Sensing of Environment.
526 2012. V. 120. Pp. 70–83.

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

529

530 **Forecast of the yield of spring grain crops for the south of Western 531 Siberia based on fluorescent radiation flows**

532

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

534

535 *Altai State University, Barnaul, 656049, Russia*

536 *E-mail: alena.karamzina@alt22.ru*

537 This work discusses a model linking the yield of spring cereals and legumes crops in the south of West Siberia with
538 fluorescent emission fluxes, which are emitted in the 600–800 nm range and represent a byproduct of the light phase
539 of photosynthesis. The primary source of information on fluorescent emission fluxes is the TROPOMI spectrometer,
540 installed onboard the Sentinel-5 Precursor satellite. The developed methodology combines fluorescence data with
541 information on sown area distribution (MCD12Q1/MODIS satellite product) and official Rosstat yield data. The key
542 hypothesis is based on a linear relationship between regional fluorescent emission levels and gross primary production,
543 which determines the biomass formation process of grain and legume crops. Analysis of TROPOMI data for the period
544 2020–2024 revealed a stable correlational between fluorescence maxima and yield indicators. It was found that
545 incorporating a loss function into the model, based on the Selyaninov hydrothermal coefficient P for the August–
546 September period, allowed for a better agreement between the maximum fluorescent emission and the specific yield
547 obtained from Rosstat data. The estimation of P was performed using results from the SEAS5 sub-seasonal climate
548 model, corrected using the Empirical Quantile Mapping (EQM). For yield forecasting in the Novosibirsk, Omsk,
549 Kemerovo regions, and Altai Krai, the coefficient of determination R^2 was 0.17, 0.79, 0.53, and 0.90, respectively, for
550 the case without accounting for losses, and 0.89, 0.88, 0.86, and 0.97, respectively, for the model with losses. The
551 research results confirm the promise of using fluorescent radiation information for monitoring and forecasting the
552 yield of spring agricultural crops in areas with risky farming.

553

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

556

557 **References**

- 561 1. *Amirova T.N.* Impact of Moisture Loss on Crop Yields during Irrigation Using the Pivot
562 Center Irrigation Method // Land Reclamation and Water Management. 2023. No. 2. P.
563 4-7. DOI 10.32962/0235-2524-2023-2-4-7.
- 564 2. *Bezrukikh V. A., Avdeeva E. V., Ivanov D. V., et al.* "Risky farming" or risks in
565 agricultural nature management of the boreal zone of Yenisei Siberia // Conifers of the
566 boreal zone. V. 42. No. 2. 2024. pp. 12-15.
- 567 3. *Bereza O.V., Strashnaya A.I., Lupyan E.A.* On the possibility of forecasting winter wheat
568 yield in the Middle Volga region based on the integration of ground-based and satellite
569 data// Modern problems of remote sensing of the Earth from space. 2015. V. 12. No. 1.
570 P. 18–30.
- 571 4. *Eroshenko F. V., Bartalev S. A., Storchak I. G. et. al.* Possibilities of remote assessment
572 of winter wheat yield based on the vegetation index of photosynthetic potential. Modern
573 problems of remote sensing of the Earth from space. 2016. V. 13. No. 4. P. 99–112.
- 574 5. *Illarionova L.V., Stepanov A.S., Prokhorets I.O.* Approximation of NDVI time series by
575 nonlinear functions for monitoring agricultural crops in the Far East // Proceedings of

- 576 the 21st International Conference "Modern Problems of Remote Sensing of the Earth
577 from Space". 2023.
- 578 6. *Kelchevskaya, L. S.* Methods of processing observations in agroclimatology. L.:
579 Gidrometeidatteidat. 1971. 215 p. <http://mgmtmo.ru/edumat/agro/kelchevskaya.pdf>
- 580 7. *Lupyan E.A., Bartalev S.A., Krasheninnikova Yu.S. et al.* Abnormal development of
581 spring crops in the regions of the European part of Russia in 2017 // Modern problems
582 of remote sensing of the Earth from space. 2017. V. 14. No. 3. P. 324–329.
- 583 8. *Simonenko E. I.* Influence of the climatic factor on yield losses of grain crops //
584 Colloquium-Journal. 2019. No. 22-7 (46). P. 26-27.
- 585 9. *Spiridonov Yu. Ya., Budynkov N. I., Azizov Z. M. et. al.* The impact of integrated weed
586 control measures on the yield and quality of winter wheat // Vavilov Readings - 2019:
587 International scientific and practical conference dedicated to the 132nd anniversary of
588 the birth of Academician N.I. Vavilov. Saratov. 2019. pp. 228-230.
- 589 10. *Fedolov, Yu. P.* Photosynthesis and respiration of plants: a tutorial for bachelors studying
590 the discipline "Plant Physiology and Biochemistry" // Kuban State Agrarian University
591 named after I.T. Trubilin. 2019. 101 p.
- 592 11. *Schmidt I. V., Latypova A. M., Tsarenko A. L.* Application of Earth remote sensing data
593 for forecasting crop yields // Regional Geosystems. 2022. V. 46. No. 4. DOI:
594 10.52575/2712-7443-2022-46-4-539-554.
- 595 12. *Shokin Yu.I., Lagutin A.A., Mordvin E.Yu., et al.* Technology for estimating gross
596 primary production based on satellite observation data// Computational technologies.
597 2023. V. 28. No. 2. Pp. 103–114. DOI: 10.25743/ICT.2023.28.2.009
- 598 13. *Shtirbet A., Riznichenko G., Rubin A., et al.* Modeling the kinetics of chlorophyll a
599 fluorescence: relationship with photosynthesis (review) // Biochemistry. 2014. V. 79.
600 No. 4. P. 379-412.
- 601 14. *Ayudhya T., Posey F. T., Tyus J. C. et al.* Using a Microscale Approach To Rapidly
602 Separate and Characterize Three Photosynthetic Pigment Species from Fern // Journal of
603 Chemical Education. 2015. V. 92. Issue 5. DOI:10.1021/ed500344c.
- 604 15. *Berger M., Moreno J., Johannessen J. A. et al.* ESA's sentinel missions in support of
605 Earth system science // Remote Sensing of Environment. 2012. V.120. Pp. 84-90. DOI:
606 10.1016/j.rse.2011.07.023.
- 607 16. *Bi Y., Wang Q., Yang Z. et al.* TanSat ACGS on-orbit spectral calibration by use of
608 individual solar lines and entire atmospheric spectra // Atmos. Meas. Tech. Discuss.
609 [preprint]. 2020. DOI: 10.5194/amt-2020-20.
- 610 17. *Butz A., Galli A., Hasekamp O. et al.* TROPOMI aboard Sentinel-5 Precursor:
611 Prospective performance of CH4 retrievals for aerosol and cirrus loaded atmospheres //
612 Remote Sensing of Environment. 2012. V. 120. Pp. 267-276. DOI:
613 10.1016/j.rse.2011.05.030.
- 614 18. *Cannon A.J., Sobie S.R., Murdock T.Q.* Bias Correction of GCM Precipitation by
615 Quantile Mapping: How Well Do Methods Preserve Changes in Quantiles and
616 Extremes?// Journal of Climate. 2015. V.28. Pp. 6938–6959. DOI: 10.1175/JCLI-D-14-
617 00754.1
- 618 19. *Doughty R., Kurosu T. P., Parazoo N. et al.* Global GOSAT, OCO-2, and OCO-3 solar-
619 induced chlorophyll fluorescence datasets // Supplement of Earth Syst. Sci. Data. 14.
620 2022. P. 1513–1529 DOI: 10.5194/essd-14-1513-2022-supplement.

- 621 20. *Elber G., Lee I.-K., Kim M.-S.* Comparing Offset Curve Approximation Methods // IEEE
622 Computer Graphics and Applications. V. 17. No 3. Pp. 62-71. DOI: 10.1109/38.586019.
623 21. *Fang J., Li X., Xiao J. et al.* Vegetation photosynthetic phenology dataset in northern
624 terrestrial ecosystems// Scientific Data. 2023. DOI: 10.1038/s41597-023-02224-w.
625 22. *Frankenberg C., Pollock R., Lee R.A.M. et al.* The Orbiting Carbon Observatory (OCO-
626 2): spectrometer performance evaluation using pre-launch direct sun measurements //
627 Atmospheric Measurement Techniques. 2015. V. 8. Pp. 301–313. DOI: 10.5194/amt-8-
628 301-2015.
629 23. *Friedl M., Sulla-Menashe, D.* (2022). MODIS/Terra+Aqua Land Cover Type Yearly L3
630 Global 500m SIN Grid V061 [Data set]. NASA Land Processes Distributed Active
631 Archive Center. DOI: 10.5067/MODIS/MCD12Q1.061 (Date Accessed: 2025-07-03)
632 24. *Friedl M.A., McIver D.K., Hedges J.C.F. et al.* Global land cover mapping from MODIS:
633 algorithms and early results // Remote Sensing of Environment. 2002. V. 83. P. 287 –
634 302. DOI: 10.1016/S0034-4257(02)00078-0.
635 25. *Friedl M. A., Sulla-Menashe D., Tan B. et al.* MODIS Collection 5 global land cover:
636 Algorithm refinements and characterization of new datasets // Remote Sensing of
637 Environment. 2010. V.114. P. 168–182. DOI: 10.1016/j.rse.2009.08.016.
638 26. *Guanter L., Bacour C., Schneider A. et al.* The TROPOSIF global suninduced
639 fluorescence dataset from the Sentinel-5P TROPOMI mission// Earth Syst. Sci. Data.
640 2021. V.13. Issue 11. DOI:10.5194/essd-13-5423-2021.
641 27. *Hersbach H., Bell B., Berrisford P. et al.* The ERA5 global reanalysis. // Q J R Meteorol
642 Soc. 2020. V. 146. Pp.1999–2049. DOI: 10.1002/qj.3803.
643 28. *Johnson S. J., Stockdale T.N., Ferranti L. et al.* SEAS5: the new ECMWF seasonal
644 forecast system // Geoscientific Model Development. 2019. V. 12(3). Pp. 1087-1117.
645 DOI: 10.5194/gmd-12-1087-2019.
646 29. *Li X., Xiao J.* TROPOMI observations allow for robust exploration of the relationship
647 between solar-induced chlorophyll fluorescence and terrestrial gross primary production
648 // Remote Sensing of Environment. 2022. V. 268. P.112748. DOI:
649 10.1016/j.rse.2021.112748.
650 30. *Liu Z., Zhao F., Liu X. et al.* Direct estimation of photosynthetic CO₂ assimilation from
651 solar-induced chlorophyll fluorescence (SIF)// Remote Sensing of Environment. 2022.
652 V. 271. 112893. DOI: 10.1016/j.rse.2022.112893.
653 31. *Lungu O.N., Chabala L.M., Shepande C.* Satellite-based crop monitoring and yield
654 estimation—a review// Journal of Agricultural Science. 2020. V.13. P.180. DOI:
655 10.5539/jas.v13n1p180.
656 32. *Magney T.S., Bowlingc D. R., Logan B. A.* Mechanistic evidence for tracking the
657 seasonality of photosynthesis with solar-induced fluorescence// PNAS. 2019. V. 116. no.
658 24. DOI: 10.1073/pnas.1900278116.
659 33. *Marshall M., Tu K., Brown J.* Optimizing a remote sensing production efficiency model
660 for macro-scale GPP and yield estimation in agroecosystems // Remote Sensing of
661 Environment. 2018. V. 217. P. 258-271. DOI: 10.1016/j.rse.2018.08.001.
662 34. *Mordvin E.Y., Pochemin N.M., Volkov N.V. et al.* Changes in Moisture Supply in the
663 Steppe Zone of the Southern Part of Western Siberia for the Period 1980–2050
664 According to Scenario Forecasts Based on Global CMIP6 Models // Arid Ecosyst. 2024.
665 V. 14, P. 259–268. DOI: 10.1134/S2079096124700203.

- 666 35. *Muñoz-Sabater J., Dutra E., Agustí-Panareda A. et al.* ERA5-Land: a state-of-the-art
667 global reanalysis dataset for land applications// *Earth Syst. Sci. Data*. 2021. V.13: Pp.
668 4349-4383. DOI: 10.5194/essd-13-4349-2021.
- 669 36. *Oshio H., Yoshida Y., Matsunaga T.* On the zero-level offset in the GOSAT TANSO-
670 FTS O₂ A band and the quality of solar-induced chlorophyll fluorescence (SIF):
671 comparison of SIF between GOSAT and OCO-2 // *Atmos. Meas. Tech.* 2019. V.12.
672 6721–6735.
- 673 37. *Peng B., Guan K., Pan M., Li Y.* Benefits of Seasonal Climate Prediction and Satellite
674 Data for Forecasting U.S. Maize Yield// *Geophysical Research Letters*. 2018. V. 45.
675 DOI: 10.1029/2018GL079291.
- 676 38. *Proctor J., Zeppetello L.V., Chan D. et al.* Climate change increases the interannual
677 variance of summer crop yields globally through changes in temperature and water
678 supply// *Science Advances*. 2025. V.11. P. 3575. DOI: 10.1126/sciadv.ady3575.
- 679 39. *Reeves M.C., Zhao M., Running, S.W.* Usefulness and limits of MODIS GPP for
680 estimating wheat yield.// *International Journal of Remote Sensing*. 2005. V.26. Pp.1403–
681 1421. DOI:10.1080/01431160512331326567.
- 682 40. *Rouse J. W., Haas R. H., Schell J. A. et al.* Monitoring vegetation systems in the Great
683 Plains with ERTS. Third ERTS-1 Symposium. NASA SP-351. 1974. Pp. 309-317.
- 684 41. *Running S.W., Nemani R.R., Heinsch F.A. et al.* A Continuous Satellite-Derived Measure
685 of Global Terrestrial Primary Production // *BioScience*. 2004. V. 54. Pp. 547–560. DOI:
686 10.1641/0006-3568(2004)054[0547:ACSMOG]2.0.CO;2.
- 687 42. *Salomonson V. V., Barnes W. L., Maymon P. W. et al.* MODIS: advanced facility
688 instrument for studies of the Earth as a system // *Transactions on Geoscience and Remote
689 Sensing*. 1989. V. 27. No. 2. Pp. 145-153. DOI: 10.1109/36.20292.
- 690 43. *Tanaka T., Sun L., Becker-Reshef I. et al.* Satellite forecasting of crop harvest can trigger
691 a cross-hemispheric production response and improve global food security//
692 *Communications Earth & Environment*. 2023. V.4. DOI: 10.1038/s43247-023-00992-2.
- 693 44. *Tucker C.J.* Red and photographic infrared linear combinations for monitoring
694 vegetation. // *Remote Sens Environ*. 1979. V. 8. Pp.127–150.
- 695 45. *Tucker C.J., Fung I.Y., Keeling C. D. et al.* Relationship between atmospheric CO₂
696 variations and a satellite-derived vegetation index// *NATURE*. 1986. V. 319. C. 195–
697 199.
- 698 46. *Veefkind J. P., Aben I., McMullan K. et al.* TROPOMI on the ESA Sentinel-5 Precursor:
699 a GMES mission for Global Observations of the Atmospheric Composition for Climate,
700 Air Quality and Ozone Layer Applications // *Remote Sensing of Environment*. 2012. V.
701 120. Pp. 70–83.
- 702 47. *Xiao J., Fisher J.B., Hashimoto H. et al.* Emerging satellite observations for diurnal
703 cycling of ecosystem processes// *Nat. Plant*. 2021. no.7. C. 877–887.