Мониторинг посевов сельскохозяйственных культур южной части Дальнего Востока в 2021–2023 гг. по данным Sentinel-2

А.С. Степанов¹, Е.А. Фомина², А.Л. Верхотуров², Л.В. Илларионова²

¹ Дальневосточный научно-исследовательский институт сельского хозяйства Хабаровск, 680009, Россия E-mail: andrey@ccfebras.ru ² Вычислительный центр ДВО РАН, Хабаровск, 680000, Россия

Постоянный мониторинг пахотных земель на основе данных дистанционного зондирования Земли является в настоящее время обязательным условием эффективного управления сельским хозяйством на уровне региона. В частности, планируемая выручка и рентабельность агропромышленного комплекса непосредственно зависит от своевременных оценок отклонения в развитии посевов, стратегии посевной кампании, выявления неиспользуемых земель. Для южной части Дальнего Востока пространственно-временная вариативность дистанционных характеристик посевов недостаточно изучена, что осложняет получение эталонных временных рядов индексов вегетации, использующихся в системе спутникового мониторинга. Были получены данные спутника Sentinel-2 в 2021–2023 гг. для пахотных земель Хабаровского края и Амурской области. Для каждого пикселя построены аппроксимированные с помощью ряда Фурье временные ряды NDVI (анел. Normalized Difference Vegetation Index) в период с 1 мая по 31 октября. Рассчитаны средние значения NDVI на каждый день вегетационного периода для сои, овса, ячменя, пшеницы, гречихи, кукурузы и залежи. Установлено, что кривые сезонного хода для классов сои, зерновых, гречихи, кукурузы и залежи имели характерную форму, при этом были схожими в Хабаровском крае и Амурской области. В период с 2021 по 2023 г. определены средние значения максимума, дня наступления максимума, коэффициентов вариации для всех классов. Выявлены достоверные различия в величине максимума и в дате его достижения для посевов сои в Хабаровском крае и Амурской области. Для неиспользуемых пахотных земель значимых региональных различий в характеристиках временных рядов выявлено не было. Высокие значения коэффициентов вариации NDVI зерновых культур во второй половине августа были обусловлены особенностями севооборота (подсев многолетних трав), что предполагает выделение подклассов посредством кластерного анализа для эффективного мониторинга состояния посевов зерновых. Было установлено, что день наступления максимума вегетации гречихи приходился либо на середину июля, либо на начало сентября, что обусловлено разными сроками сева. В целом использование временных рядов NDVI по данным Sentinel-2 с аппроксимацией рядом Фурье позволяет решать основные задачи мониторинга сельхозкультур юга Дальнего Востока, такие как идентификация и оценка отклонений в развитии посевов, выявление залежных земель, контроль севооборотов. При этом для классов зерновые и гречиха при построении эталонных временных рядов NDVI было предложено провести предварительную кластеризацию.

Ключевые слова: мониторинг, Дальний Восток, NDVI, временной ряд, вариативность, сельское хозяйство

Одобрена к печати: 10.02.2025 DOI: 10.21046/2070-7401-2025-22-2-120-133

Введение

Согласно Земельному кодексу РФ, мониторинг сельскохозяйственных земель включает систему оперативных, периодических и базовых наблюдений за изменением качественного и количественного состояния земель сельскохозяйственного назначения и обследований этих земель, почв и их растительного покрова, проводимых с определённой периодичностью (https://rulaws.ru/Zemelnyy-kodeks/). Использование данных дистанционного зондирования Земли позволяет эффективно решать задачи сельскохозяйственного мониторинга, минимизируя затраты на проведение наземных наблюдений (Терехин, 2023; Федотова и др., 2020).

Оценка состояния растительного покрова отдельных территорий может проводиться на основе анализа многолетних временных рядов индекса NDVI (*англ.* Normalized Difference Vegetation Index), а также основных характеристик этих рядов за интересующий вегетационный период (Терехов и др., 2023). Разработанный в ИКИ РАН метод, реализованный в системе «Bera-Science», заключался в анализе отклонений динамики наблюдаемых индексов от средних многолетних наблюдений для оценки развития посевов сельскохозяйственных культур различных субъектов Российской Федерации (Толпин и др., 2014).

По мнению ряда исследователей, для объективной оценки состояния растительного покрова и особенностей развития сельхозкультур необходимо учитывать временную и пространственную вариацию сезонного хода вегетационных индексов, обусловленную климатическими различиями в пределах региона (Cao et al., 2020; de la Casaa et al., 2018; Gong et al., 2023). В этих работах основной акцент был сделан на анализе коэффициентов вариации значений временных рядов индексов вегетации и определении взаимосвязи между вариабельностью и изменениями температуры, влажности и прочих факторов.

Для мониторинга состояния посевов, а также для картографирования, выявления неиспользуемых земель и пр. исследователи достаточно часто используют временные ряды NDVI, полученные по данным спутника Sentinel-2. Высокое пространственное и временное разрешение, глобальное покрытие территории (от 56° ю. ш. до 83° с. ш.), общедоступность данных и инструментов для обработки обусловили развитие методов систематического мониторинга для реализации многих задач, в том числе и в сельском хозяйстве. Так, например, для некоторых регионов России проведён анализ вариативности значений временных рядов NDVI для сельскохозяйственных объектов (полей) различной площади (Кашницкий и др., 2023). Вместе с тем вариабельность временных рядов NDVI и их характеристик зависит не только от размера полей, но также и от произрастающей культуры, что также необходимо учитывать при создании и построении эталонных кривых для мониторинга (Хвостиков, Барталев, 2018). В статье (Пинясова, Павлова, 2024) для идентификации и анализа состояния посевов овса и пшеницы, а также земель под паром на территории республики Хакасия в 2022 г. изучалась динамика минимальных, максимальных и средних месячных значений индекса NDVI (по данным Sentinel-2) в ходе вегетации. Были рассчитаны доверительные интервалы для эталонных кривых разных классов и проведена оценка возможности идентификации посевов с учётом отклонений временных рядов.

Вместе с тем исследование вариативности временных рядов индексов вегетации и основных показателей рядов целесообразно проводить для предварительно аппроксимированных данных, что позволяет избежать завышенных значений коэффициентов вариации, обусловленных отсутствием данных, вызванных облачными явлениями, асинхронностью дат спутниковой съёмки для разных территорий и лет наблюдения и другими факторами. Эта проблема характерна и для российского Дальнего Востока с его муссонным климатом, что обусловило появление проблемы разреженности временных рядов. Восстановление временных рядов данных дистанционных измерений в информационных сервисах, разработанных в ИКИ РАН, осуществлялось скользящей оконной аппроксимацией на основе полиномов второй степени (Плотников и др., 2014). Для аппроксимации временных рядов NDVI также использовались полиномы разной степени (Нао et al., 2019), функция Гаусса (Johnsson, Eklundh, 2002), логистические функции (Yang et al., 2019) и ряд других нелинейных функций (Vorobiova, Chernov, 2017). Аппроксимация вегетационных кривых позволяет не только восстанавливать целостность временных рядов, но также выявлять время начала и продолжительность фаз развития растений (с целью определения возможных отклонений) (Liu et al., 2022). Ранее было установлено, что для российского Дальнего Востока наиболее высокая точность аппроксимации временного ряда NDVI для всех культур достигалась при применении ряда Фурье (Степанов и др., 2023). Предложенный метод аппроксимации стал основой представленных в настоящей статье исследований по изучению временных рядов NDVI разных сельхозкультур Дальнего Востока, анализа пространственной и временной вариативности. Таким образом, цель работы заключалась в оценке возможности использования временных рядов NDVI, построенных по данным Sentinel-2, для мониторинга посевов сельхозкультур южной части Дальнего Востока. При этом в исследовании использовались только верифицированные данные по севообороту отдельных полей муниципальных образований региона (2021–2023), что вызвано зачастую отсутствием или недостоверностью информации в федеральных базах данных. Для достижения цели поставлены следующие задачи:

- 1. Сформировать временные ряды NDVI по изображениям Sentinel-2 для пикселей в границах сельхозполей Хабаровского края и Амурской области в 2021–2023 гг.
- 2. Получить средние временные ряды сезонного хода NDVI для разных сельхозкультур; определить их характеристики, пространственную и временную вариабельность.

Данные, методы и технологии

Рассматривались пахотные земли, расположенные в Хабаровском крае (Хабаровский муниципальный район, правый берег реки Амур) и Амурской области (Белогорский, Бурейский, Ивановский, Константиновский, Михайловский, Октябрьский и Тамбовский районы) (*puc. 1*).



Рис. 1. Область исследования: пахотные земли Хабаровского края и Амурской области

В работе были использованы данные о севообороте 112 сельскохозяйственных полей в 2021 г., 405 полей в 2022 г., 417 полей в 2023 г. (Хабаровский край) и 220 полей в 2021 г., 524 полей в 2022 г., 346 полей в 2023 г. (Амурская область). Общая площадь исследуемых

полей составила более 260 000 га, в выборку вошли поля с разными сельхозкультурами: соя — 222 745 га, кукуруза — 6374 га, зерновые культуры (пшеница, овёс, ячмень) — 28 687 га, а также неиспользуемые земли (залежь) — 4948 га. Посевные мероприятия в районе проводятся с начала мая, уборка — до конца октября.

Для исследуемых территорий в период 2021–2023 гг. было получено 432 мультиспектральных снимка уровня обработки Level 2A со спутников Sentinel-2A/В пространственного разрешения 10 м. На *рис. 2* представлено распределение безоблачных и облачных снимков для одного из полей Хабаровского края и Амурской области в вегетационный период каждого года.



Рис. 2. Спутниковые данные Sentinel-2: *а* — Хабаровский край, *б* — Амурская область. Зелёным цветом обозначены безоблачные снимки (менее 20 % облачности), красным — снимки с высокой облачностью

Обработка снимков была проведена с использованием библиотек Rasterio и Osgeo языка Python. Индекс NDVI для безоблачных пикселей вычислялся по формуле:

$NDVI = \frac{NIR - RED}{NIR + RED},$

где NIR — отражение в ближней инфракрасной области спектра, RED — отражение в красной области спектра. Для каждого пикселя в 2021, 2022 и 2023 гг. были построены временные ряды в период с 1 мая по 31 октября. Ряды имели разное число значений, при этом значения соответствовали разным календарным датам для Хабаровского края и Амурской области, а также для разных лет наблюдения. Для расчёта на все дни периода временные ряды аппроксимировались с использованием двух первых членов разложения в ряд Фурье (Степанов и др., 2023):

$$f = a_0 + a_1 \cos(xw) + b_1 \sin(xw) + a_2 \cos(2xw) + b_2 \sin(2xw),$$

где a_0, a_1, a_2, b_1, b_2 — числовые коэффициенты.

В результате были получены еженедельные пиксельные композиты вегетационного индекса NDVI с 121-го по 296-й день года. На следующем этапе для каждого сельскохозяйственного поля рассчитывались средние значения NDVI всех пикселей, соответствующих данному полю.

В качестве основных характеристик аппроксимированных временных рядов были рассмотрены следующие показатели:

NDVI_{max} — максимальное значение временного ряда NDVI для отдельного поля;

DOY_{max} — календарный день года, соответствующий NDVI_{max}.

Оценка достоверности различий характеристик аппроксимированных временных рядов в зависимости от года и региона исследования проводилась с использованием двухфакторного дисперсионного анализа, попарное сравнение на основе критерия Тьюки на уровне значимости 95 %.







Рис. 4. Средние значения коэффициентов вариации по календарным дням для аппроксимированных временных рядов NDVI в Хабаровском крае и Амурской области (пахотные земли, 2021–2023 гг.): *a* − соя; *δ* − овёс; *в* − ячмень; *г* − пшеница; *д* − кукуруза; *е* − гречиха; *ж* − залежь (вертикальными линиями соответствующего цвета обозначены доверительные интервалы дней наступления максимума)

Результаты расчётов и их обсуждение

На *рис. 3* представлены средние значения аппроксимированных временных рядов NDVI по отдельным полям на каждый день вегетационного периода для всех рассмотренных классов сельхозкультур, а также залежных земель Хабаровского края и Амурской области в 2023 г. (для гречихи в Амурской области — 2022 г., в связи с отсутствием информации о посевах 2023 г.). Как видно, кривые сезонного хода для каждого класса растительности имели характерную форму, при этом были схожими в разных регионах Дальнего Востока. В частности, максимальные значения NDVI сои и кукурузы приходились на август (217–230-й календарные дни года), для зерновых культур — на июль (188–208-й календарные дни года). Залежь характеризовалась продолжительным и плавным максимумом, а гречиха — экстремумом в конце августа – первой декаде сентября, что связано с поздним севом культуры.

Вариабельность средних значений NDVI, рассчитанных для всех полей одного класса на каждый день временного периода, представлена на *рис.* 4 (см. с. 125). Для большинства культур характерны низкие коэффициенты вариации в первые и последние дни интервала, потом рост значений (связано с разными сроками сева), снижение вариабельности в доверительном интервале дня максимума с последующим ростом (обусловленным сроками уборки). Для культур с продолжительным вегетационным периодом, таких как соя и кукуруза, это было достаточно ярко выражено (см. *рис.* 4*a*, *d*). Вариабельность NDVI этих культур в доверительном интервале дня максимума находилась в диапазоне 5–13 %. Доверительный интервал дня максимума находилась в диапазоне 5–13 %. Доверительный интервал дня максимума находилась в диапазоне 5–13 %. Доверительный интервал дня максимума неиспользуемых пахотных земель достаточно широкий, с конца мая и до последней декады сентября, а значения коэффициента вариации NDVI не превышали 15 % (см. *рис.* 4m). После уборки в зависимости от особенностей севооборота, связанного с отсутствием или наличием подсева многолетних трав к овсу, ячменю, пшенице, значения NDVI могли различаться существенно.

Регион	Характеристика	Год			<i>Р</i> -статистика
		2021	2022	2023	
Хабаровский край	NDVI _{max}	0,81	0,88	0,92	<i>P</i> < 0,05
	VAR _{NDVI}	7,10	4,90	5,00	
Амурская область	NDVI _{max}	0,85	0,90	0,90	
	VAR _{NDVI}	9,70	7,40	8,60	
<i>Р</i> -статистика		P < 0			
		$t_{(2021-2023)} < 0.05, t_{(2022-2023)} > 0.05$			
Хабаровский край	DOY _{max}	226,7	220,6	229,7	<i>P</i> < 0,05
	VAR _{DOY}	4,1	3,0	2,9	
Амурская область	DOY _{max}	221,7	219,2	217,6	
	VAR _{DOY}	8,6	4,5	4,3	
<i>Р</i> -статистика		<i>P</i> > 0,05		·	

Таблица 1. Характеристики временных рядов NDVI для посевов сои в Хабаровском крае и Амурской области, 2021–2023 гг.

В *табл.* 1–5 представлены средние значения максимумов NDVI и календарных дат, соответствующих максимумам, для разных культур. Установлено, что NDVI_{max} для сои зависели от года и региона выращивания (см. *табл.* 1). Минимальные значения для обоих регионов соответствовали 2021 г. Вариабельность максимума составляла 5–10 %. Вместе с тем дата максимума значимо не менялась по годам наблюдений, но зависела от региона — несколько позже максимум наступал в Хабаровском крае. Вариабельность дня максимума в Хабаровском крае находилась в диапазоне от 3,0 до 4,1 %, а в Амурской области — от 4,3 до 8,6 %.

Значения максимума NDVI для овса отличались достаточно большой вариабельностью в разные годы (15 % в 2023 г. в Хабаровском крае и 43,8 % в 2022 г. в Амурской области), при этом не зависели от года и региона (см. *табл. 2*). Связано это как с сортовым разнообразием, так и с разными сроками сева. Более поздний сев в Амурской области способствовал позднему наступлению дня максимума — на 2–3 недели позже, чем в Хабаровском крае.

Регион	Характеристика	Год			<i>Р</i> -статистика
		2021	2022	2023	
Хабаровский край	NDVI _{max}	0,68	0,77	0,71	<i>P</i> > 0,05
	VAR _{NDVI}	9,60	5,80	14,50	
Амурская область	NDVI _{max}	_	0,59	0,71	
	VAR _{NDVI}	-	43,80	13,50	
<i>Р</i> -статистика		<i>P</i> > 0,05			
Хабаровский край	DOY _{max}	200,3	184,7	195,5	<i>P</i> < 0,05
	VAR _{DOY}	2,0	3,0	10,9	
Амурская область	DOY _{max}	_	208,5	209,2	
	VAR _{DOY}	_	8,9	9,6	
Р-статистика		P < 0 $t_{(2021-2023)}$	$(05; t_{(2021-2022)}) > 0,05, t_{(2022-2)}$	0,05, 0,05, 0,05 $0,05$	

Таблица 2. Характеристики временных рядов NDVI для посевов овса в Хабаровском крае и Амурской области, 2021–2023 гг.

Таблица 3. Характеристики временных рядов NDVI для посевов ячменя в Хабаровском крае и Амурской области, 2021–2023 гг.

Регион	Характеристика	Год			<i>Р</i> -статистика
		2021	2022	2023	
Хабаровский край	NDVI _{max}	-	0,75	0,66	<i>P</i> < 0,05
	VAR _{NDVI}	_	7,00	19,10	
Амурская область	NDVI _{max}	0,79	0,83	0,84	
	VAR _{NDVI}	2,40	10,50	7,40	
<i>Р</i> -статистика		$\begin{array}{l} P < 0.05; \ t_{(2021-2022)} > 0.05, \\ t_{(2021-2023)} < 0.05, \ t_{(2022-2023)} < 0.05 \end{array}$			
Хабаровский край	DOY _{max}	-	225,0	207,9	<i>P</i> < 0,05
	VAR _{DOY}	-	20,2	19,0	
Амурская область	DOY _{max}	193,3	194,0	202,2	
	VAR _{DOY}	1,2	9,4	9,2	
<i>Р</i> -статистика			<i>P</i> > 0,05		

Регион	Характеристика	Год			<i>Р</i> -статистика
		2021	2022	2023	
Хабаровский край	NDVI _{max}	_	0,77	0,66	<i>P</i> > 0,05
	VAR _{NDVI}	_	4,60	14,30	
Амурская область	NDVI _{max}	0,83	0,75	0,79	
	VAR _{NDVI}	5,60	17,00	9,40	
<i>Р</i> -статистика		$\begin{array}{l} P < 0.05; t_{(2021-2022)} < 0.05, \\ t_{(2021-2023)} < 0.05, t_{(2022-2023)} > 0.05 \end{array}$			
Хабаровский край	DOY _{max}	_	182,3	188,2	<i>P</i> < 0,05
	VAR _{DOY}	_	1,7	5,0	_
Амурская область	DOY _{max}	187,4	198,0	191,8	
	VAR _{DOY}	12,4	9,6	5,6	
<i>Р</i> -статистика			<i>P</i> > 0,05		

Таблица 4. Характеристики временных рядов NDVI для посевов пшеницы в Хабаровском крае и Амурской области, 2021–2023 гг.

Таблица 5. Характеристики временных рядов NDVI для посевов гречихи в Хабаровском крае и Амурской области, 2021–2023 гг.

Регион	Характеристики	Год			<i>Р</i> -статистика
		2021	2022	2023	
Хабаровский край	NDVI _{max}	0,68	0,88	0,81	<i>P</i> > 0,05
	VAR _{NDVI}	6,90	3,70	3,30	
Амурская область	NDVI _{max}	-	0,72	—	
	VAR _{NDVI}	_	2,80	_	
<i>Р</i> -статистика		$\begin{array}{c} P < 0.05; t_{(2021-2022)} < 0.05, \\ t_{(2021-2023)} < 0.05, t_{(2022-2023)} < 0.05 \end{array}$			
Хабаровский край	DOY _{max}	248,0	196,0	241,3	<i>P</i> < 0,05
	VAR _{DOY}	8,0	1,7	1,2	
Амурская область	DOY _{max}	_	245,0	_	
	VAR _{DOY}	_	4,8	_	
Р-статистика		P < 0 $t_{(2021-2023)}$	$\begin{array}{c} 0.05; \ \overline{t_{(2021-2022)}} < \\ 0.05, \ t_{(2022-20)} \end{array}$	0,05, 0,005, 0,005	

Для посевов ячменя и пшеницы коэффициент вариации максимумов NDVI находился в диапазоне от 2,4 до 17,0 %, при этом наиболее высокий показатель также соответствовал 2022 г. (см. *табл. 3–4*). Значения максимума NDVI ячменя в Амурской области были достоверно выше, чем в Хабаровском крае, при этом NDVI_{тах} также приходились на более ранние календарные дни. Напротив, максимум NDVI пшеницы достигался раньше в Хабаровском крае и на одну-две недели опережал соответствующие показатели Амурской области. В целом достаточно низкая доля пахотных площадей под зерновыми культурами в Амурской области и Хабаровском крае, посевы селекционных сортов, севообороты с подсевом снижают возможности идентификации овса, ячменя и пшеницы как отдельных классов и предполагают объединение в один класс зерновых культур для решения основных задач сельскохозяйственного мониторинга.

Регион	Характеристики	Год			<i>Р</i> -статистика
		2021	2022	2023	
Хабаровский край	NDVI _{max}	0,71	0,87	0,82	<i>P</i> > 0,05
	VAR _{NDVI}	1,10	7,70	9,50	
Амурская область	NDVI _{max}	0,86	0,87	0,92	-
	VAR _{NDVI}	2,40	9,20	1,20	
<i>Р</i> -статистика		<i>P</i> > 0,05			
Хабаровский край	DOY _{max}	229,5	224,5	229,5	<i>P</i> > 0,05
	VAR _{DOY}	2,2	3,4	2,6	
Амурская область	DOY _{max}	226,0	224,3	219,0	-
	VAR _{DOY}	2,5	6,7	3,2	
<i>Р</i> -статистика			<i>P</i> > 0,05	*	

Таблица 6. Характеристики временных рядов NDVI для посевов кукурузы в Хабаровском крае и Амурской области, 2021–2023 гг.

Таблица 7. Характеристики временных рядов NDVI залежи в Хабаровском крае и Амурской области, 2021–2023 гг.

Регион	Характеристики	Год			<i>Р</i> -статистика
		2021	2022	2023	
Хабаровский край	NDVI _{max}	0,76	0,84	0,83	<i>P</i> > 0,05
	VAR _{NDVI}	4,70	5,80	5,80	
Амурская область	NDVI _{max}	_	0,86	0,87	
	VAR _{NDVI}	_	6,80	7,50	
<i>Р</i> -статистика		$P < 0.05; t_{(2021-2022)} < 0.05,$			
		$t_{(2021-2023)} < 0.05, t_{(2022-2023)} > 0.05$			
Хабаровский край	DOY _{max}	201,9	191,1	195,27	<i>P</i> > 0,05
	VAR _{DOY}	7,2	6,0	9,60	
Амурская область	DOY _{max}	_	205,0	202,20	-
	VAR _{DOY}	_	10,2	4,00	
<i>Р</i> -статистика		$P < 0.05; t_{(2021-2022)} < 0.05,$			
		$t_{(2021-2023)}$	$< 0.05, t_{(2022-20)}$	$_{(023)} > 0.05$	

В последнее время на территории юга Дальнего Востока проводились мероприятия по восстановлению сева гречихи. В связи с тем, что культура является чувствительной к погодным условиям и изменениям технологий выращивания (Клыков и др., 2020), в 2022 г. в Хабаровском крае сев культуры экспериментально был сдвинут с середины июля на начало июня. Изменения в среднем значении дня максимума отражены в *maбл. 5* — как видно, в 2022 г. в Хабаровском крае этот показатель соответствовал 196-му календарному дню (середина июля), в то время как в 2021 и 2023 гг. в Хабаровском крае и в 2022 г. в Амурской области пришёлся на период с 241-го по 248-й календарный день (конец августа – начало сентября). При этом значения максимума NDVI были достоверно выше в 2022 г. В связи с тем, что гречиха имеет достаточно короткий вегетационный цикл и сев может быть существенно смещён по времени, при проведении сельскохозяйственного мониторинга на основе данных дистанционного зондирования Земли необходимо учитывать этот факт. В частности, предложено провести предварительную кластеризацию временных рядов пикселей с гречихой для выделения полей с ранними сроками сева.

Основные характеристики временных рядов NDVI кукурузы южной части Дальнего Востока схожи с соответствующими показателями сои. Как видно из *табл. 6*, максимальные значения NDVI приходились на 219–230-й календарные дни (середина августа), при этом не выявлено значимых различий между двумя субъектами Дальневосточного федерального округа, а также годами наблюдений.

Для неиспользуемых пахотных земель не было выявлено значимых различий для средних NDVI_{max} и DOY_{max} в Хабаровском крае и Амурской области (*табл. 7*). Максимум в Хабаровском крае в 2021 г. приходился на более ранний период, среднее значение максимума в 2021 г. существенно ниже показателей 2022 и 2023 гг. Вариабельность дня максимума находилась в диапазоне 4,0–10,2 %, при этом относительно невысокие значения коэффициента вариации обусловлены аппроксимацией.

Заключение

Для основных сельхозкультур и залежных земель Хабаровского края и Амурской области были построены аппроксимированные с использованием ряда Фурье временные ряды сезонного хода NDVI, рассчитаны средние значения максимума и дня его наступления. Были выявлены значимые различия в величине максимума и в дате его достижения для посевов сои Хабаровского края и Амурской области. Для неиспользуемых пахотных земель достоверных различий в характеристиках временных рядов выявлено не было. Высокие значения коэффициентов вариации NDVI зерновых культур (до 40 %) во второй половине августа были обусловлены особенностями севооборота (подсев многолетних трав), что предполагает выделение подклассов посредством кластерного анализа для эффективного мониторинга состояния посевов зерновых. Схожие значения величины максимума и даты его достижения для овса, ячменя, пшеницы показали, с другой стороны, целесообразность объединения этих культур в класс зерновые при проведении оперативного мониторинга. Было установлено, что день наступления максимума вегетации гречихи приходился либо на середину июля, либо на начало сентября, что обусловлено разными сроками сева. Таким образом, для классов зерновые и гречиха может быть предложено построить не один эталонный временной ряд NDVI для каждого класса, а два по результатам предварительной кластеризации. В целом использование временных рядов NDVI по данным Sentinel-2 с аппроксимацией рядом Фурье позволяет решать основные задачи мониторинга сельхозкультур юга Дальнего Востока, такие как идентификация и оценка отклонений в развитии посевов, выявление залежных земель, контроль севооборотов.

Исследование выполнено за счёт гранта Российского научного фонда № 23-76-00007, https://rscf.ru/project/23-76-00007/.

Литература

- 1. Кашницкий А. В., Лупян Е. А., Плотников Д. Е., Толпин В. А. Анализ возможности использования данных различного пространственного разрешения при проведении мониторинга объектов // Современные проблемы дистанционного зондирования Земли из космоса. 2023. Т. 20. № 2. С. 60–74. DOI: 10.21046/2070-7401-2023-20-2-60-74.
- 2. *Клыков А. Г., Тимошинова О.А., Муругова Г.А.* Формирование урожайности, технологических и биохимических качеств зерна гречихи в условиях Приморского края // Дальневосточный аграрный вестн. 2020. № 4(56). С. 32–35. DOI: 10.24411/1999-6837-2020-14045.
- 3. *Пинясова Е. В., Павлова Е. В.* Анализ распределения индекса NDVI на посевной площади пашни Республики Хакасия по данным дистанционного зондирования Земли // Современные про-

блемы дистанционного зондирования Земли из космоса. 2024. Т. 21. № 3. С. 121–130. DOI: 10.21046/2070-7401-2024-21-3-121-130.

- 4. Плотников Д. Е., Миклашевич Т. С., Барталев С.А. Восстановление временных рядов данных дистанционных измерений методом полиномиальной аппроксимации в скользящем окне переменного размера // Современные проблемы дистанционного зондирования Земли из космоса. 2014. Т. 11. № 2. С. 103–110.
- 5. *Степанов А. С., Фомина Е. А., Илларионова Л. В. и др.* Аппроксимация временных рядов индексов вегетации (NDVI и EVI) для мониторинга сельхозкультур (посевов) Хабаровского края // Информатика и автоматизация. 2023. Т. 22. № 6. С. 1473–1498. DOI: 10.15622/ia.22.6.8.
- 6. *Терехин Э.А.* Анализ спектрально-отражательных свойств залежных земель Среднерусской лесостепи по данным Sentinel-2 // Компьютерная оптика. 2023. Т. 47. № 2. С. 306–313. DOI: 10.18287/2412-6179-CO-1160.
- 7. *Терехов А. Г., Сагатдинова Г. Н., Мухамедиев Р. И. и др.* Перспективы использования псевдоцветных композитов при анализе многолетних временных рядов спутниковых данных в задаче оценки состояния растительного покрова // Современные проблемы дистанционного зондирования Земли из космоса. 2023. Т. 20. № 6. С. 51–66. DOI: 10.21046/2070-7401-2023-20-6-51-66.
- 8. *Толпин В.А., Лупян Е.А., Барталёв С.А., Плотников Д.Е., Матвеев А.М.* Возможности анализа состояния сельскохозяйственной растительности с использованием спутникового сервиса «ВЕГА» // Оптика атмосферы и океана. 2014. Т. 27. № 7. С. 581–586.
- 9. Федотова Е. В., Маглинец Ю. А., Брежнев Р. В., Стародубцев А. И. Опыт прогнозирования урожайности сельскохозяйственных культур с использованием имитационных моделей // Вестн. КрасГАУ. 2020. Вып. 8. С. 43–48. DOI: 10.36718/1819-4036-2020-8-43-48.
- Хвостиков С.А., Барталев С.А. Построение эталонов сезонной динамики NDVI для основных сельскохозяйственных культур // Информац. технологии в дистанционном зондировании Земли RORSE 2018: электрон. сб. ст. 16-й конф. Москва: ИКИ РАН, 2018. С. 55–59. DOI: 10.21046/rorse2018.55.
- 11. *Cao J., Zhang Z., Tao F. et al.* Identifying the contributions of multi-source data for winter wheat yield prediction in China // Remote Sensing. 2020. V. 12. Article 750. DOI: 10.3390/rs12050750.
- 12. *de la Casaa A., Ovandoa G., Bressanini L.* Soybean crop coverage estimation from NDVI images with different spatial resolution to evaluate yield variability in a plot // ISPRS J. Photogrammetry and Remote Sensing. 2018. V. 146. P. 531–547. DOI: 10.1016/j.isprsjprs.2018.10.018.
- 13. *Gong H., Cheng Q., Jin H., Ren Y.* Effects of temporal, spatial, and elevational variation in bioclimatic indices on the NDVI of different vegetation types in Southwest China // Ecological Indicators. 2023. V. 154. Article 110499. DOI: 10.1016/j.ecolind.2023.110499.
- 14. *Hao P., Tang H., Chen Z.* High resolution crop intensity mapping using harmonized Landsat-8 and Sentinel-2 data // J. Integrative Agriculture. 2019. V. 18. No. 12. P. 2883–2897. DOI: 10.1016/S2095-3119(19)62599-2.
- 15. *Jonsson P., Eklundh L.* Seasonality extraction by function fitting to time-series of satellite sensor data // IEEE Trans. Geoscience and Remote Sensing. 2002. V. 40. No. 8. P. 1824–1832.
- 16. *Liu L., Cao R., Chen J. et al.* Detecting crop phenology from vegetation index time-series data by improved shape model fitting in each phenological stage // Remote Sensing of Environment. 2022. V. 277. Article 113060. DOI: 10.1016/j.rse.2022.113060.
- 17. *Vorobiova N., Chernov A.* Curve fitting of MODIS NDVI time series in the task of early crops identification by satellite images // Procedia Engeneering. 2017. V. 201. P. 184–195. DOI: 10.1016/j.proeng.2017.09.596.
- 18. Yang Y. P., Luo J. C., Huang Q. T. Weighted double-logistic function fitting method for reconstructing the high-quality Sentinel-2 NDVI time series data set // Remote Sensing. 2019. V. 11. Article 18. DOI: 10.3390/rs11202342.

Crops monitoring in the south of the Far East in 2021–2023 using Sentinel-2 data

A. S. Stepanov¹, E. A. Fomina², A. L. Verkhoturov², L. V. Illarionova²

¹ Far Eastern Agricultural Research Institute, Khabarovsk 680009, Russia E-mail: andrey@ccfebras.ru ² Computing Center FEB RAS, Khabarovsk 680000, Russia

Continuous monitoring of arable lands based on remote sensing data is currently a prerequisite for efficient agricultural management at the regional level. In particular, the planned revenue and profitability of the agro-industrial complex directly depends on timely assessments of deviations in the development of crops, the strategy of the sowing campaign, and the identification of unused land. For the southern part of the Far East, the spatial and temporal variability of remote characteristics of crops has not been sufficiently studied, which complicates obtaining reference time series of vegetation indices for use in a satellite monitoring system. For arable lands of Khabarovsk Krai and Amur Region, 2021–2023 Sentinel-2 satellite data have been obtained. For each pixel, NDVI (Normalized Difference Vegetation Index) time series approximated using a Fourier series were constructed for the period from May 1 to October 31. Average NDVI values were calculated for each day of the growing season for soybeans, oats, barley, wheat, buckwheat, corn and fallow. It was established that the seasonal curves for the classes of soybeans, grains, buckwheat, corn and fallow had a characteristic shape and were similar in Khabarovsk Krai and Amur Region. Between 2021 and 2023, the average values of the maximum, the day of the maximum, and coefficients of variation for all classes were determined. Significant differences in the magnitude of the maximum and in the date of reaching the maximum for soybean crops in Khabarovsk Krai and Amur Region were revealed. For unused arable land, no significant regional differences in time series characteristics were identified. High values of NDVI coefficients of variation of grain crops in the second half of August were due to peculiarities of crop rotation (overseeding of perennial grasses), which suggests identification of subclasses through cluster analysis for effective monitoring of the state of grain crops. It was found that the day of NDVI maximum in the growing season for buckwheat occurred either in mid-July or in early September, which was due to different sowing dates. In general, the use of NDVI time series based on Sentinel-2 data with Fourier series approximation makes it possible to solve the main problems of monitoring agricultural crops in the south of the Far East, such as identifying and assessing deviations in the development of crops, identifying fallow lands and monitoring crop rotations. At the same time for the grains and buckwheat classes, when constructing reference NDVI time series it was proposed to carry out preliminary clustering.

Keywords: monitoring, Far East, NDVI, time series, variability, agriculture

Accepted: 10.02.2025 DOI: 10.21046/2070-7401-2025-22-2-120-133

References

- 1. Kashnitskii A. V., Loupian E. A., Plotnikov D. E., Tolpin V. A., Analysis of the possibility of using different spatial resolution data for objects monitoring, *Sovremennye problemy distantsionnogo zondirovaniya Zemli iz kosmosa*, 2023, V. 20, No. 2, pp. 60–74 (in Russian), DOI: 10.21046/2070-7401-2023-20-2-60-74.
- Klykov A. G., Timoshinova O. A., Murugova G. A., Crop yield, technological and biochemical qualities of buckwheat in the climates of the Primorsky Region, *Far Eastern agricultural herald*, 2020, V. 4(56), pp. 32–35 (in Russian), DOI: 10.24411/1999-6837-2020-14045.
- 3. Pinyasova E. V., Pavlova E. V., Analysis of the distribution of the NDVI index on the arable land area of the Republic of Khakassia according to remote sensing data, *Sovremennye problemy distantsionnogo zondirovaniya Zemli iz kosmosa*, 2024, V. 21, No. 3, pp. 121–130 (in Russian), DOI: 10.21046/2070-7401-2024-21-3-121-130.
- 4. Plotnikov D. E., Miklashevich T. S., Bartalev S. A., Using local polynomial approximation within moving window for remote sensing data time-series smoothing and data gaps recovery, *Sovremennye problemy distantsionnogo zondirovaniya Zemli iz kosmosa*, 2014, V. 11, No. 2, pp. 103–110 (in Russian).
- 5. Stepanov A. C., Fomina E. A., Illarionova L. V. et al., Vegetation indices (NDVI and EVI) time series approximation for monitoring crops of Khabarovsk territory, *Informatics and Automation*, 2023, V. 22, No. 6, pp. 1473–1498 (in Russian), DOI: 10.15622/ia.22.6.8.

- 6. Terekhin E. A., Spectral reflectance analysis of abandoned agricultural lands in the Central Russian foreststeppe using Sentinel-2 satellite data, *Computer Optics*, 2023, V. 47, No. 2, pp. 306–313 (in Russian), DOI: 10.18287/2412-6179-CO-1160.
- Terekhov A. G., Sagatdinova G. N., Mukhamediev R. I. et al., Prospects for the use of pseudo-color image processing in analysis of long-term time series of satellite data in the task of assessing vegetation cover state, *Sovremennye problemy distantsionnogo zondirovaniya Zemli iz kosmosa*, 2023, V. 20, No. 6, pp. 51–66 (in Russian), DOI: 10.21046/2070-7401-2023-20-6-51-66.
- 8. Tolpin V.A., Loupian E.A., Bartalev S.A., Plotnikov D.E., Matveev A.M., Agricultural crops analysis abilities with the VEGA satellite service, *Optika Atmosfery i Okeana*, 2014, V. 27, No. 7, pp. 581–586 (in Russian).
- 9. Fedotova E. V., Maglinets Yu. A., Brezhnev R. V., Starodubtsev A. I., The experience in crop yields forecasting using simulation models, *Bulliten KrasGAU*, 2020, Iss. 8, pp. 43–48 (in Russian), DOI: 10.36718/1819-4036-2020-8-43-48.
- Khvostikov S.A., Bartalev S.A., Development of seasonal NDVI profiles references for main agricultural crops, *Informatsionnye tekhnologii v distantsionnom zondirovanii Zemli RORSE 2018: ehlektronnyi sbornik statei 16-i konferentsii* (Proc. 16th Conf. "Current Problems in Remote Sensing of the Earth From Space: Principal physics, methods and techniques for monitoring the environment, potentially dangerous phenomena and objects"), Moscow: IKI RAS, 2018, pp. 55–59 (in Russian), DOI: 10.21046/rorse2018.55.
- 11. Cao J., Zhang Z., Tao F. et al., Identifying the contributions of multi-source data for winter wheat yield prediction in China, *Remote Sensing*, 2020, V. 12, Article 750, DOI: 10.3390/rs12050750.
- de la Casaa A., Ovandoa G., Bressanini L., Soybean crop coverage estimation from NDVI images with different spatial resolution to evaluate yield variability in a plot, *ISPRS J. Photogrammetry and Remote Sensing*, 2018, V. 146, P. 531–547, DOI: 10.1016/j.isprsjprs.2018.10.018.
- 13. Gong H., Cheng Q., Jin H., Ren Y., Effects of temporal, spatial, and elevational variation in bioclimatic indices on the NDVI of different vegetation types in Southwest China, *Ecological Indicators*, 2023, V. 154, Article 110499, DOI: 10.1016/j.ecolind.2023.110499.
- 14. Hao P., Tang H., Chen Z., High resolution crop intensity mapping using harmonized Landsat-8 and Sentinel-2 data, *J. Integrative Agriculture*, 2019, V. 18, No. 12, pp. 2883–2897, DOI: 10.1016/S2095-3119(19)62599-2.
- 15. Jonsson P., Eklundh L., Seasonality extraction by function fitting to time-series of satellite sensor data, *IEEE Trans. Geoscience and Remote Sensing*, 2002, V. 40, No. 8, pp. 1824–1832.
- 16. Liu L., Cao R., Chen J. et al., Detecting crop phenology from vegetation index time-series data by improved shape model fitting in each phenological stage, *Remote Sensing of Environment*, 2022, V. 277, Article 113060, DOI: 10.1016/j.rse.2022.113060.
- 17. Vorobiova N., Chernov A., Curve fitting of MODIS NDVI time series in the task of early crops identification by satellite images, *Procedia Engeneering*, 2017, V. 201, pp. 184–195, DOI: 10.1016/j. proeng.2017.09.596.
- 18. Yang Y.P., Luo J.C., Huang Q.T., Weighted double-logistic function fitting method for reconstructing the high-quality Sentinel-2 NDVI time series data set, *Remote Sensing*, 2019, V. 11, Article 18, DOI: 10.3390/rs11202342.