

А. Л. Верхотуров^{1✉}, А. С. Степанов²

Возможности спутниковой радиолокации для мониторинга пахотных земель

¹Вычислительный центр Дальневосточного отделения Российской академии наук
(ВЦ ДВО РАН), г. Хабаровск, Российская Федерация

²Дальневосточный научно-исследовательский институт сельского хозяйства
(ДВ НИИСХ), Хабаровский край, с. Восточное, Российская Федерация
e-mail: andrey@ccfebras.ru

Аннотация. В работе представлены возможности спутникового радиолокационного мониторинга сельскохозяйственных культур Хабаровского края по данным миссий Sentinel-1A/B за период наблюдений с 2019 по 2021 гг., ALOS-2 и SMAP за 2023 г. Для пахотных полей с культурами (соя, овес), а также неиспользуемых земель были сформированы временные серии радиолокационных вегетационных индексов, рассчитаны показатели интерферометрической когерентности и влажности почв. Результаты исследования свидетельствуют о наличии характерной сезонной динамики у индексов DpRVI, RVI и VH/VV для каждой изучаемой культуры. DpRVI обладает наибольшей устойчивостью по сравнению с остальными рассматриваемыми индексами. Установлено, что статистическая значимость показателей коэффициентов вариации сезонного хода DpRVI ниже, чем у индексов RVI и VH/VV. Выявлено, что отношение значений когерентности VH-поляризации к VV коррелирует с NDVI и может быть использовано для мониторинга роста культур ($R^2=0,87$ для сои, $R^2=0,89$ для овса). Проведена сравнительная характеристика определения влажности почв и данных полевых исследований (модель Dubois и модель Surface Moisture Index).

Ключевые слова: дистанционное зондирование Земли, данные радиолокационной спутниковой съемки, мониторинг сельскохозяйственных земель, вегетационные индексы, интерферометрическая когерентность, влажность почв

A. L. Verkhoturov^{1✉}, A. S. Stepanov²

SAR data capability for crop monitoring

¹Computing Center of the Far Eastern Branch of the Russian Academy of Sciences
(CC FEB RAS), Khabarovsk, Russian Federation

²Far Eastern Research Institute of Agriculture (FEARI), Vostochnoye, Russian Federation
e-mail: andrey@ccfebras.ru

Abstract. The paper presents the capabilities of satellite SAR monitoring of crops in Khabarovsk Krai using data from Sentinel-1A/B missions for the observation period from 2019 to 2021, ALOS-2 and SMAP for 2023. Time series of SAR vegetation indices were formed for arable fields with crops (soybean, oats), as well fallow lands, interferometric coherence and soil moisture indices were calculated. The results of the study indicate the presence of characteristic seasonal dynamics in DpRVI, RVI and VH/VV indices for each crop studied. DpRVI has the highest stability compared to the other indices considered. It was found that the statistical significance of the indices of the coefficients of variation of seasonal course DpRVI is lower than that of the indices RVI and VH/VV. The ratio of VH-polarisation to VV-polarisation coherence values was found to correlate with NDVI and can be used to monitor crop growth ($R^2=0.87$ for soybean, $R^2=0.89$ for oats). A comparative

characterisation of soil moisture measuring and in situ data (Dubois model and Surface Moisture Index model) was carried out.

Keywords: remote sensing, synthetic-aperture radar data, agricultural land monitoring, vegetation indices, coherence, soil moisture

Введение

Наряду с данными в оптическом диапазоне длин волн, на текущий момент одним из эффективных инструментов мониторинга сельскохозяйственных (с/х) культур являются данные с радиолокаторов с синтезированной апертурой (РСА). Они позволяют получать достаточно полную информацию о состоянии пахотных земель, проводить классификацию культур, измерять влажность почв и поверхности растительного покрова [1–3]. Существующие алгоритмы радиолокационных вегетационных индексов [4–6] учитывают особенности съемки в режиме двойной поляризации, что делает возможным их применение к данным миссии Sentinel-1A/B. При этом, в расчетах используется коэффициент обратного рассеяния радарного сигнала различных поляризаций. В отличие от индексов, значения интерферометрической когерентности зависят от фазы сигнала, и она чувствительна к изменениям между съемками, вызванным растительностью и ее активным ростом. Эти данные потенциально пригодны для использования в качестве замены NDVI (Normalized Difference Vegetation Index) [7]. К тому же, в настоящее время разработаны методы и алгоритмы определения влажности почв по материалам радиолокационной съемки [2, 3, 8, 9]. Вода представляет собой уникальный объект для дистанционного зондирования в микроволновом диапазоне, который используется системами с РСА и скаттерометрами. Будучи единственной природной средой с высокой диэлектрической проницаемостью (ϵ), она оказывает значительное влияние на электромагнитные характеристики почвы, снежного покрова и растительности: увеличение содержания жидкой воды в этих средах приводит к возрастанию ϵ , что, в свою очередь, существенно изменяет параметры рассеяния и поглощения микроволнового излучения. Удельная эффективная площадь рассеяния (σ^0), регистрируемая РСА, определяется комплексом факторов, включая диэлектрические свойства приповерхностного слоя, шероховатость поверхности и биомассы. Таким образом, данные РСА представляют собой особый интерес в исследованиях и в задачах мониторинга с/х угодий.

Целью данной работы является оценка возможностей спутниковой радиолокации для мониторинга пахотных земель. Были поставлены следующие задачи: оценить вариативность временных рядов радиолокационных вегетационных индексов для сои, овса и залежи; провести сравнительную оценку интерферометрической когерентности различных комбинаций поляризметрических каналов с NDVI; сравнить характеристики влажности почв по данным SMAP, ALOS-2 и полевым исследованиям.

Область исследования и используемые данные

Исследование проводилось на с/х полях правобережья реки Амур за период 2019–2021 гг. В качестве входных данных были использованы спутниковые

снимки С-диапазона (длина волны 5,6 см) Sentinel-1B, спутниковые снимки L-диапазона (длина волны 24 см) ALOS-2, данные спутниковой миссии SMAP (Soil Moisture Active Passive), данные измерений влажности почв in situ (таблица 1).

Таблица 1

Параметры радиолокационной съемки исследуемой территории

Спутнико- вая миссия	Период наблюдения	Режим съемки	Пространственное разре- шение	Поляризация
Sentinel-1B	С мая по ок- тябрь 2019– 2021 гг.	IW	10 м × 10 м	VV, VH
ALOS-2	С мая по ок- тябрь 2023 г.	ScanSAR	25 м × 25 м	HH, HV
SMAP	С мая по ок- тябрь 2023 г.	-	9 км × 9 км	H,V

Результаты исследования

Для каждого типа растительности в период 2019–2021 гг. были определены основные характеристики кривых сезонного хода вегетационных индексов (DpRVI, RVI и VH/VV): значения максимума, день наступления максимума. Было установлено, что временные ряды индекса DpRVI имеют наименьшую вариативность в сравнении с VH/VV и RVI. В качестве примера на рисунке 1 представлены значения временного ряда DpRVI для всех полей сои Хабаровского края в 2021 году. Как видно, большинство кривых имеют характерную форму, различия в форме вызваны неоднородностью роста сои.

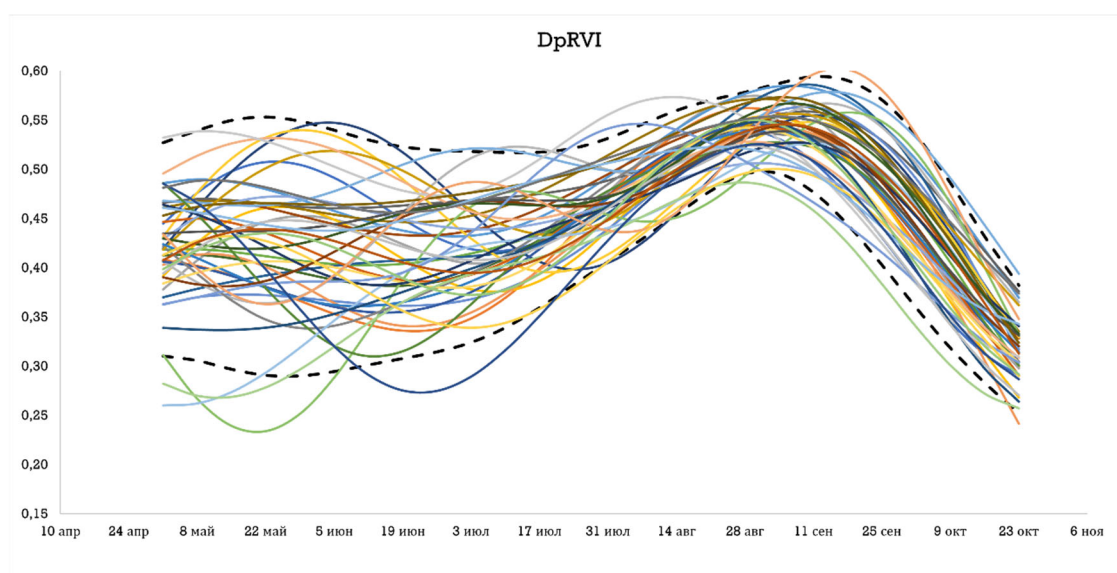


Рис. 1. Временная серия DpRVI сельскохозяйственных полей сои Хабаровского края.

На рисунке 2 приведены временные ряды когерентности для полей сои в 2021. Значения когерентности чувствительны к изменениям отражательных свойств поверхности между съемками, что позволяет использовать её для определения сроков посева и даты уборки культур. Выявлено, что отношение значений когерентности VH-поляризации к VV коррелирует с NDVI и может быть использовано для мониторинга роста культур ($R^2=0,87$ для сои, $R^2=0,89$ для овса).

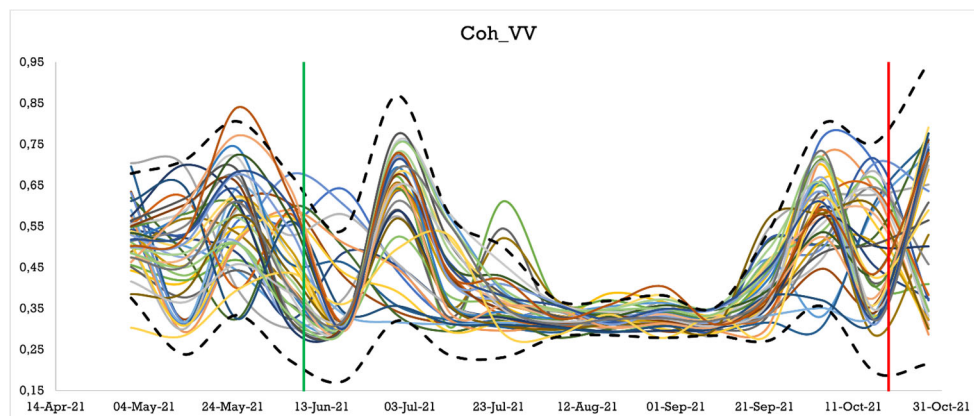


Рис. 2. Временная серия когерентности сельскохозяйственных полей сои Хабаровского края.

За вегетационный период 2023 года были проведены исследования влажности почв с применением двух полуэмпирических моделей: модель Dubois [2] и SurfMI [3] по данным ALOS-2. Для оценки возможности использования моделей анализировались данные метеостанции (осадки, мм) и результаты измерений показателей влажности в образцах почвы пахотного горизонта. Анализ показал, что, во-первых, данные SMAP согласовывались с результатами наземных наблюдений, во-вторых, модель Dubois продемонстрировала более высокую точность, а модель SurfMI завышала результаты. Было отмечено, что чувствительность к влажности почв данных L-диапазона для культур плотного покрова выше, чем для С-диапазона длин волн. При этом чувствительность радиолокационных данных L-диапазона не зависела от классов растительности.

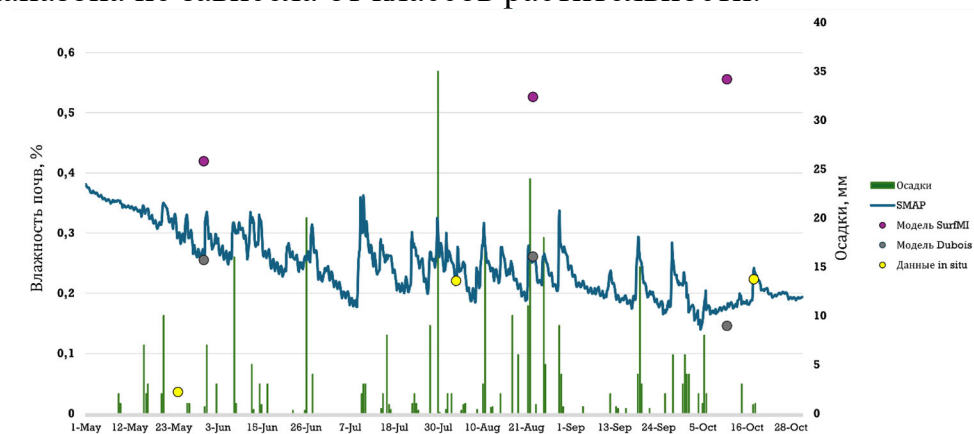


Рис. 3. Показатели влажности почв.

Модель Dubois – серый цвет, модель SurfMI – фиолетовый цвет, данные SMAP – синий цвет, данные полевых исследований – желтый цвет, осадки – зеленый цвет.

Выводы

Установлена, что данные спутниковой радиолокационной съемки могут быть использованы в комплексном мониторинге земель сельхозназначения. Во-первых, временные ряды DpRVI имеют наименьшую вариабельность среди радарных индексов и могут быть использованы в качестве эталонных в моделях машинного обучения. Во-вторых, когерентность имеет высокую корреляцию с NDVI, хорошую чувствительность к изменению отражательных свойств поверхности, и, таким образом, может служить индикатором сева и уборки. В-третьих, влажность пахотных земель может быть оценена с помощью радиолокационных моделей (модели влагосодержания почв Dubois по данным ALOS-2). Вместе с тем, запуск российских радиолокационных спутников, а также вывод на орбиту нового Sentinel-1C предполагает сравнительную оценку качества модели Dubois и для прочих спутников в дальнейшем.

Благодарности

Исследование выполнено при финансовой поддержке проекта РНФ № 24-11-20030 и Правительства Хабаровского края № 106С/2024 от 31.07.2024.

БИБЛИОГРАФИЧЕСКИЙ СПИСОК

1. Eisfelder C., Boemke B., Gessner U. et al. Cropland and Crop Type Classification with Sentinel-1 and Sentinel-2 Time Series Using Google Earth Engine for Agricultural Monitoring in Ethiopia // Remote Sensing. – 2024. – Vol. 16(5). – P. 866.
2. Dubois P.C., van Zyl J., Engman T. Measuring soil moisture with imaging radars // IEEE Transactions on Geoscience and Remote Sensing. – 1995. – Vol. 33(4). – Pp. 915–926.
3. Urban M., Berger C., Mudau T.E. et al. Surface Moisture and Vegetation Cover Analysis for Drought Monitoring in the Southern Kruger National Park Using Sentinel-1, Sentinel-2, and Landsat-8 // Remote Sensing. – 2018. – Vol. 10(9). – P. 1482.
4. Kim Y., van Zyl J.J. A Time-Series Approach to Estimate Soil Moisture Using Polarimetric Radar Data // IEEE Transactions on Geoscience and Remote Sensing. – 2009. – Vol. 47(8). – Pp. 2519–2527.
5. Kumar S.D., Rao S.S., Sharma J.R. Radar Vegetation Index as an Alternative to NDVI for Monitoring of Soyabean and Cotton // Indian Cartographer. – 2013. – Vol. 23. – Pp. 91-96.
6. Mandal D., Kumar V., Ratha D., et al. Dual polarimetric radar vegetation index for crop growth monitoring using Sentinel-1 SAR data // Remote Sensing of Environment. – 2020. – Vol. 247. – Pp. 111954.
7. Villarroya-Carpio A., Lopez-Sanchez J.M. Multi-Annual Evaluation of Time Series of Sentinel-1 Interferometric Coherence as a Tool for Crop Monitoring // Sensors. – 2023. – Vol. 23(4). – P. 1833.
8. Oh Y. Quantitative retrieval of soil moisture content and surface roughness from multipolarized radar observations of bare soil surfaces // IEEE Transactions on Geoscience and Remote Sensing. – 2004. – Vol. 42(3). – Pp. 596-601.
9. Музалевский К.В. Широкополосный рефлектометрический метод измерения влажности и степени шероховатости поверхности почвы // Журнал радиоэлектроники. – 2022. – Т. 12.

© А. Л. Верхотуров, А. С. Степанов, 2025