

*А. Л. Верхотуров<sup>1\*</sup>, А. С. Степанов<sup>2</sup>, А. А. Сорокин<sup>1</sup>, А. С. Бордаков<sup>1</sup>*

## **Опыт использования спутниковых радиолокационных данных для идентификации и мониторинга состояния посевов сельскохозяйственных культур (на примере Хабаровского района и Амурской области)**

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

<sup>2</sup> Дальневосточный научно-исследовательский институт сельского хозяйства (ДВ НИИСХ), Хабаровский край, с. Восточное, Российская Федерация

\* e-mail: andrey@ccfebras.ru

**Аннотация.** В работе рассмотрены возможности радиолокационных спутниковых данных в задачах идентификации и мониторинга сельскохозяйственных культур. По данным съемки миссии Sentinel-1 на примере пахотных земель Хабаровского края и Амурской области были сформированы временные серии радиолокационных вегетационных индексов DpRVI, RVI и VH/VV. За каждую дату были рассчитаны значения коэффициентов вариации, меры близости (евклидово расстояние) и характеристики экстремумов временных рядов индексов для пахотных земель сои, овса и залежи. Показано, что для каждой культуры кривые сезонного хода DpRVI, RVI, VH/VV имели характерный вид. Установлено, что DpRVI продемонстрировал наиболее высокую устойчивость. Показано, что коэффициенты вариации сезонного хода DpRVI были существенно ниже показателей для RVI и VH/VV. Выявлено, что сходство между сезонным ходом индексов сохранялось для удаленных друг от друга регионов – Хабаровского края и Амурской области. Сделан вывод о том, что временные ряды радиолокационных индексов DpRVI, RVI, VH/VV для основных типов сельскохозяйственных земель Дальнего Востока имеют отличительные особенности и могут быть использованы в задачах классификации.

**Ключевые слова:** дистанционное зонирование Земли, данные радиолокационной спутниковой съемки, идентификация сельскохозяйственных культур, мониторинг сельскохозяйственных земель, вегетационные индексы

*А. Л. Verkhoturov<sup>1\*</sup>, А. С. Stepanov<sup>2</sup>, А. А. Sorokin<sup>1</sup>, А. С. Bordakov<sup>1</sup>*

## **Experience in using SAR data to identification and monitoring of agricultural crops (on example of the Khabarovsk krai and Amur oblast)**

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

<sup>2</sup> Far Eastern Research Institute of Agriculture (FEARI), Vostochnoye, Russian Federation

\* e-mail: andrey@ccfebras.ru

**Abstract.** The paper considers the possibilities of synthetic aperture radar (SAR) data in the tasks of identification and monitoring of agricultural crops. Using the Sentinel-1 mission imagery data, time series of radar vegetation indices DpRVI, RVI and VH/VV were formed on the example of arable land in Khabarovsk Krai and Amur Oblast. For each date, the values of coefficients of variation,

proximity measure (Euclidean distance) and characteristics of extremes of time series of SAR indices for soybean, oat and fallow croplands were calculated. It is shown that for each crop the curves of seasonal course of DpRVI, RVI, VH/VV had a characteristic form. It is established that DpRVI demonstrated the highest stability. It is shown that the coefficients of variation of the seasonal course of DpRVI were significantly lower than those for RVI and VH/VV. It was revealed that the similarity between the seasonal course of indices was preserved for the regions remote from each other - Khabarovsk Krai and Amur Oblast. It is concluded that time series of SAR indices DpRVI, RVI, VH/VV for the main types of agricultural land in the Far East have distinctive features and can be used in the tasks of classification, yield modelling and crop rotation control.

**Keywords:** remote sensing, synthetic-aperture radar data, crop identification, agricultural land monitoring, vegetation indices

### *Введение*

В настоящее время современные методы и технологии данных дистанционного зондирования Земли составляют основу систем мониторинга сельскохозяйственных культур как в масштабах региона, так и страны. В последние годы, исследования в рассматриваемой области сосредоточены на задачах оценки состояния, мониторинга хода роста и идентификации возделываемых сельскохозяйственных культур. На современном этапе эти задачи являются важнейшими и связаны с обеспечением продовольственной безопасности страны. Это позволяет достичь стратегической цели по переходу к цифровому сельскому хозяйству на региональном уровне. Актуальность их решения непосредственно связана с пониманием тенденций развития сельскохозяйственного (с/х) производства, обеспечением продовольственной безопасности и борьбой с краткосрочными и долгосрочными угрозами. Стоит отметить, что данные дистанционного зондирования Земли оптического диапазона длин волн позволяют комплексно решать такие научные и научно-технические задачи, используя вегетационные индексы, например такой как Normalized Difference Vegetation Index (нормализованный разностный вегетационный индекс, NDVI). Однако основной проблемой использования оптических снимков является наличие искаженных данных спутниковых наблюдений, возникшие вследствие неблагоприятных условий съемки, пропусков во временном ряду из-за высокой облачности, теней от облаков и аэрозолей паров воды в атмосфере. Для восстановления спектрально-отражательных характеристик растительного покрова необходимо проводить предварительную обработку изображений, использовать специализированные алгоритмы [1] или применять дополнительные источники данных.

Одним из эффективных инструментов, которые позволяют преодолевать эти ограничения, являются поляриметрические радиолокаторы с синтезированной апертурой (РСА). Электромагнитное излучение микроволнового диапазона частот почти не поглощается и не рассеивается облаками, что позволяет получать изображения земной поверхности и расположенных на ней объектов независимо от времени суток и метеорологических условий. К тому же чувствительность радиоволн к диэлектрическим и геометрическим свойствам радиолокационных целей, сделало данные РСА полезными для мониторинга урожая с/х культур, особенно для регионов с высокой облачностью.

Необходимо отдельно упомянуть о появлении концепции вегетационных индексов по данным РСА изображений. В 2009 году был предложен Radar Vegetation Index (RVI) [2]. Другие исследователи разработали алгоритмы для вычисления индексов Generalized Radar Vegetation Index (GRVI) [3] и Compact-Pol Radar Vegetation Index (CpRVI) [4]. Для расчетов RVI, GRVI и CpRVI используются полностью поляриметрические радарные изображения. С появлением общедоступных данных со спутников РСА миссии Sentinel-1A/B, параметры систематической съемки которой позволяют снимать раз в 6 или 12 суток – были разработаны алгоритмы вычисления индексов с двойной поляризацией. Среди них можно выделить следующие: индекс RVI для двух поляризаций [5-7], Polarimetric Radar Vegetation Index (PRVI) [8], Dual Polarization SAR Vegetation Index (DPSVI) [9] и Dual Polarimetric Radar Vegetation Index (DpRVI) [10].

Таким образом, с разработкой новых алгоритмов радарных вегетационных индексов, а также наряду с развитием спутниковых космических аппаратов РСА, отсутствие комплексных исследований их особенностей и характеристик для с/х культур является актуальной проблемой. Еще до конца не ясно каким образом каждая отдельная культура будет вести себя во временной серии SAR изображений. Это зависит от многих факторов: пространственный масштаб, своевременность и регулярность съемок, климатические условия, состав почв, угол съемки и др. Работы по системному внедрению этих индексов в задачах сельского хозяйства будут иметь не только прикладное, но и фундаментальное значение. Поиск новых ранее не исследованных, но устойчивых индексов важен в связи с развитием точного и цифрового земледелия. Исходя из этого, целью данной работы является проведение анализа и оценка радарных вегетационных индексов, сравнение их устойчивости во временной серии РСА изображений, исследование возможности идентификации с/х культур по данным радиолокационной съемки, установление характерного вида хода роста каждой культуры, исследование поведения культур для разных регионов.

### *Территория исследования и используемые данные*

В качестве объектов исследования были использованы 342 с/х поля. Они располагаются в Дальневосточном федеральном округе на территориях Хабаровского края и Амурской области. Был проведен анализ для трех с/х культур: соя, овес и залежные земли. Общая площадь исследуемых полей составляет 13201 га. В Хабаровском крае 128 полей, среди них соя – 1147 га (33 поля), овес – 751 га (30 полей), залежь – 1491 га (65 полей). В Амурской области 214 полей, среди них соя (184 поля) – 8207 га, овес 623 га (16 полей) и залежь 982 га (14 полей).

Для исследования были использованы временные ряды РСА спутника Sentinel-1B, содержащие в себе комплексные значения радиолокационных данных 1-го уровня обработки за период с мая по октябрь 2021 г. Изображения получены в С-диапазоне (длина волны 5,6 см) на нисходящей орбите в режиме интерферометрической съемки на согласованной вертикальной (VV) и кросс-поляризациях (VH). Всего было три подспутникового трека (3 сцены с относительным номером орбиты) для каждого по 16 изображений, табл. 1.

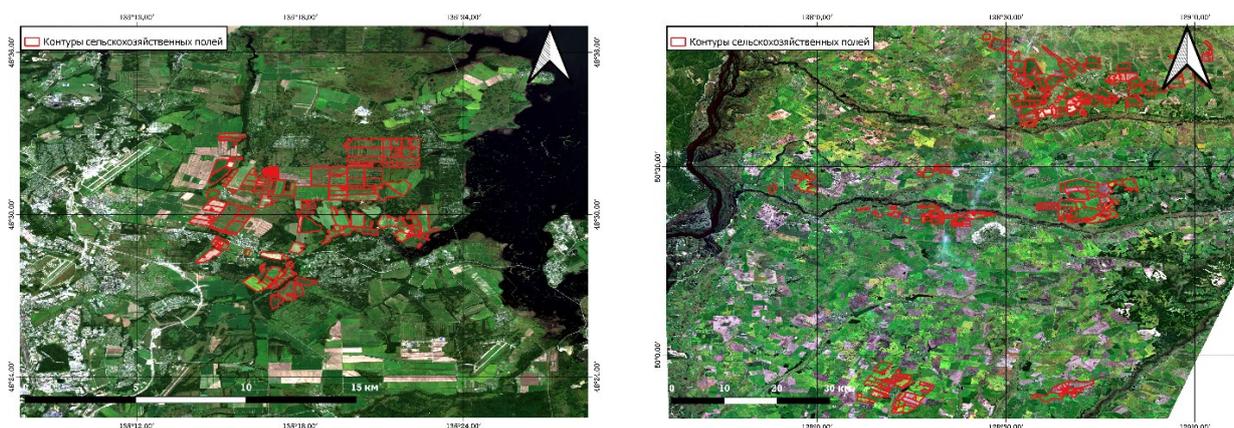


Рис. 1. Территория исследования. Сельскохозяйственные поля Хабаровского края (слева) и Амурской области (справа)

Таблица 1

Параметры радиолокационной съемки исследуемой территории

Исследуемая территория	Период наблюдения	Режим съемки	Угол падения при съемке	Тип спутниковой орбиты	Относительный номер орбиты	Пространственное разрешение*	Поляризация
Хабаровский край	С мая по октябрь 2021 г.	IW3	38.3 – 43.1	Нисходящая	90	14м x 14м	VV, VH
Хабаровский край	С мая по октябрь 2021 г.	IW1	30.22 – 32.47	Нисходящая	105	14м x 14м	VV, VH
Амурская область	С мая по октябрь 2021 г.	IW3	38.3 – 43.1	Нисходящая	134	14м x 14м	VV, VH

\* - пространственное разрешение после применения процедуры некогерентного накопления

**Методы и материалы**

Обработка данных для расчета радарных вегетационных индексов проводилась в программном обеспечении SNAP v.9.0 (<http://step.esa.int/main/>, по состоянию на 07 мая 2024 г.) с помощью модуля Graph Processing Tool (GPF) и PolSARPro v.6.03. В качестве выходной информации был сформирован временной ряд в растровом формате (\*.tif) радиолокационных индексов для каждого поля с культурой. Методика получения таких рядов опирается на преобразование комплексных величин, полученных одновременно в нескольких поляризационных каналах, методом поляриметрической декомпозиции, в которых содержится вся информация о поляриметрических свойствах рассеяния зондируемой поверхности. Данная технология более подробно описана в работах [11, 12]. Были рассчитаны три индекса, формулы которых имеют следующий вид:

$$\sigma_{VHVV} = \frac{\sigma_{VH}^0}{\sigma_{VV}^0}, \quad (1)$$

$$RVI = \frac{4 \cdot \sigma_{VH}^0}{\sigma_{VV}^0 + \sigma_{VH}^0}, \quad (2)$$

$$DpRVI = 1 - m \cdot \beta = 1 - \sqrt{\frac{4 \cdot |C_2|}{(Tr(C_2))^2}} \cdot \frac{\lambda_1}{\lambda_1 + \lambda_2}, \quad (3)$$

$$C_2 = U_2 \cdot \Sigma \cdot U_2^{-1}, \text{ где } \Sigma = \begin{bmatrix} \lambda_1 & 0 \\ 0 & \lambda_2 \end{bmatrix},$$

где  $\sigma_{VH}^0$  – коэффициент обратного рассеяния радиолокационного сигнала (дБ) для VH поляризации;

$\sigma_{VV}^0$  – коэффициент обратного рассеяния радиолокационного сигнала (дБ) для VV поляризации;

$m$  – степень поляризации ( $0 \leq m \leq 1$ ), которая определяется как отношение (средней) интенсивности поляризованной части волны к (средней) общей интенсивности волны;

$\beta$  – мера доминирующего механизма рассеяния, которая определяется из разложения матрицы  $C_2$  на два неотрицательных собственных значения ( $\lambda_1 \geq \lambda_2 \geq 0$ );

$Tr$  – сумма диагональных элементов матрицы;

$| |$  – определитель матрицы.

Оценка пространственной устойчивости радарных индексов для с/х полей с разными культурами проводилась с использованием коэффициента вариации. Для степени сходства временной серии изображений была рассчитана мера близости (евклидово расстояние). В качестве входных данных выступали временные серии радарных индексов  $VH/VV$ ,  $RVI$  и  $DpRVI$ . Формулы для расчетов имеют следующий вид:

$$VAR(VI)_i = \frac{\sigma(VI)_i}{\overline{VI}_i} \cdot 100\%, \quad (4)$$

$$D(VI)_i = \left( \frac{VI_i^{KHAB}}{\overline{VI}_i^{KHAB}} - \frac{VI_i^{AMU}}{\overline{VI}_i^{AMU}} \right)^2, \quad (5)$$

$i \in (1..m)$

где  $VAR$  – коэффициент вариации;

$D$  – евклидово расстояние между значениями;

$VI$  – значение вегетационного индекса (один из  $VH/VV$ ,  $RVI$ ,  $DpRVI$ );

$m$  – количество дат спутниковых съемок;

$\sigma(VI)_i$  – стандартное отклонение величины  $VI$ ;

$\overline{VI}_i^{KHAB}$  – среднее значение вегетационного индекса для всех полей с одной культурой в Хабаровском крае;

$\overline{VI}_i^{AMU}$  – среднее значение вегетационного индекса для всех полей с одной культурой в Амурской области;

Были рассчитаны средние значения максимума и дня наступления максимума, а также  $\Delta \overline{VI}_{max}$  и  $\Delta \overline{DOY}_{max}$ .

$$\Delta \overline{VI}_{max} = t(p, f) \cdot \sigma(VI_{max}), \quad (6)$$

$$\Delta \overline{DOY}_{max} = t(p, f) \cdot \sigma(DOY_{max}), \quad (7)$$

где  $DOY$  – номер дня в году;

$\sigma(VI_{max})$  – стандартное отклонение величины  $VI_{max}$  по всем полям на определенную дату для одной культуры;

$\sigma(DOY_{max})$  – стандартное отклонение величины  $DOY_{max}$  по всем полям на определенную дату для одной культуры;

$t(p, f)$  – значения t-критерия,  $p=0,05$ .

### Результаты

В результате проведенного анализа попарного сходства значений временных рядов индексов вегетации выяснилось, что для исследуемых территорий (Хабаровский край и Амурская область) значения меры близости для индекса  $DpRVI$  были наименьшими. Это говорит об устойчивости данного индекса. Значения для  $VH/VV$ , были наибольшими, как показано на рис. 2. Для полей с соей  $d=0,41; 0,68; 0,84$ , соответственно для  $DpRVI, RVI$  и  $VH/VV$ . Для полей с овсом и залежных земель значения  $d$  составили  $0,45; 0,68; 0,89$  и  $0,24; 0,40; 0,50$ .

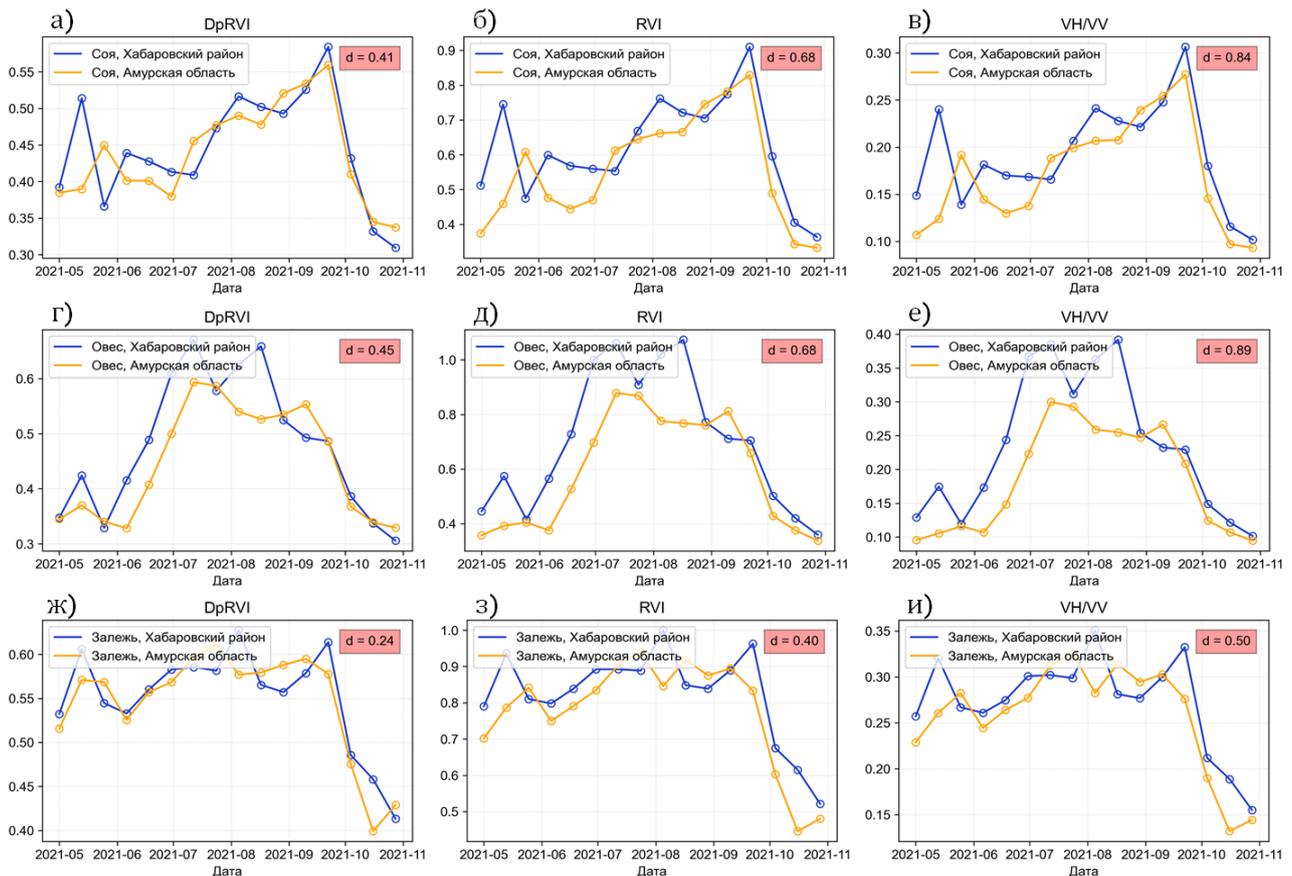


Рис. 2. Средние значения временных рядов евклидова расстояния  $DpRVI, RVI, VH/VV$  для сельскохозяйственных земель 2021 года в Хабаровском крае и Амурской области: а), б), в) – соя; г), д), е) – овес; ж), з), и) – залежь.

Исследования variability сезонного хода индексов  $VI$  для отдельных полей подтвердили наибольшую стабильность и устойчивость индекса  $DpRVI$ . Variability трех индексов в период вегетационного цикла для всех исследуемых классов существенно различается (рис. 3). Так, например, для сои в Хабаровском крае значения  $VAR$  в период с мая по первую декаду июля для  $DpRVI$  находились на уровне 10–15 %, для  $RVI$  на уровне 13–18 %, и  $VH/VV$  – 18–23 % (рис. 3а). С середины июля до третьей декады сентября variability  $DpRVI$  снизилась до 5–8%, а  $RVI$  и  $VH/VV$ , соответственно, до 8–12 % и 10–15 %. В Амурской области соответствующие значения коэффициентов вариации в период максимального набора биомассы – июль-август для  $DpRVI$  составили 6–10 %, для  $RVI$  – 10–18 %, для  $VH/VV$  – 8 %, 12 %, 15 % (рис. 3б). Более высокие значения коэффициентов вариации для сезонного хода  $VI$  для полей с соей в Амурской области могли быть объяснены сортовым разнообразием сои в регионе.

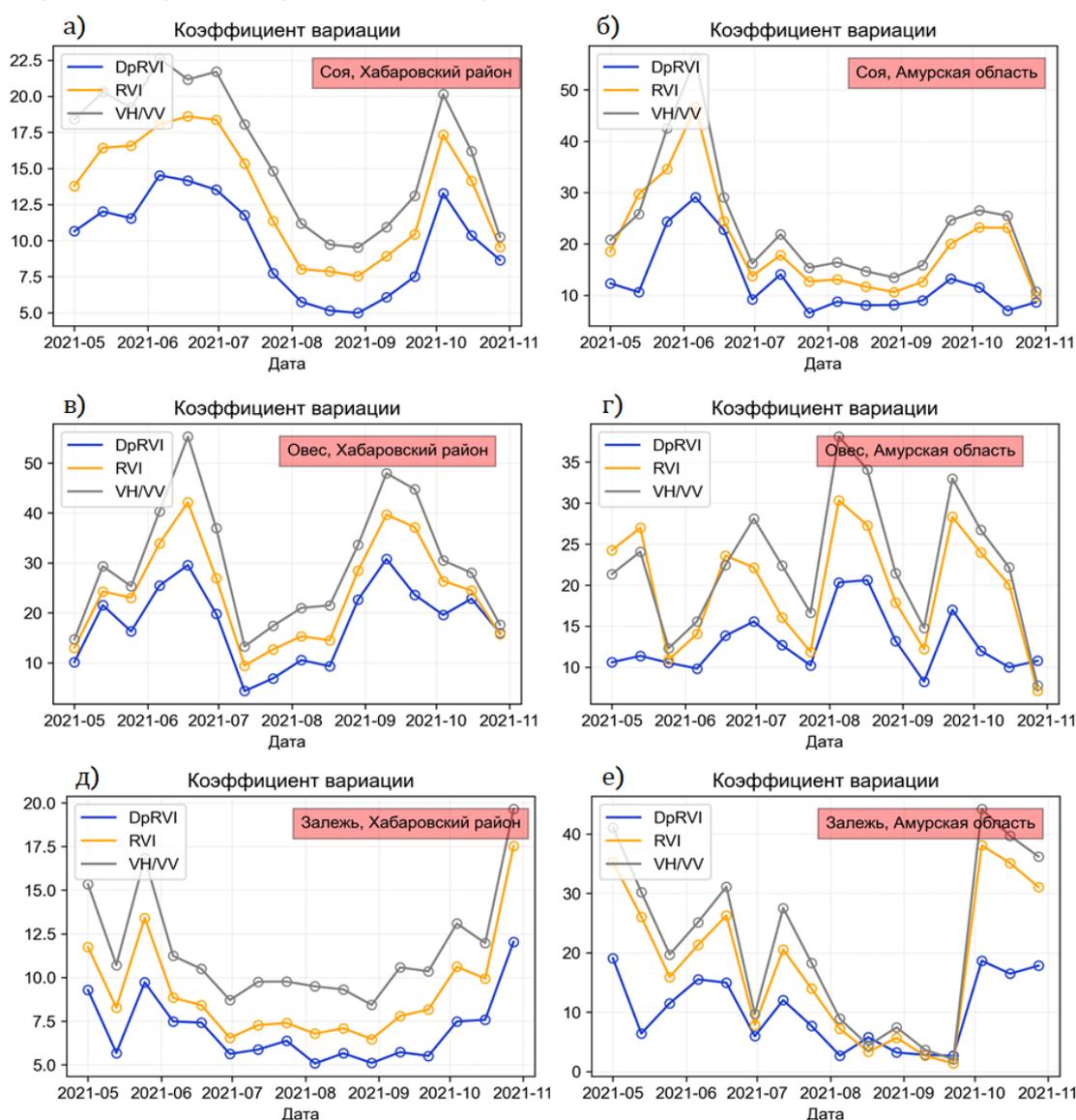


Рис. 3. Средние значения временных рядов коэффициента вариации  $DpRVI$ ,  $RVI$ ,  $VH/VV$  для сельскохозяйственных земель 2021 года в Хабаровском крае и Амурской области: а), б) – соя; в), г) – овес; д), е) – залежь.

Были рассчитаны численные значения среднего максимума  $VI$ , среднего значения дня наступления максимума, а также вариабельность этих показателей отдельно для Хабаровского края и Амурской области. Как видно из таблицы 2 на примере сои, средние значения  $\overline{VI_{max}}$  и  $\overline{DOY_{max}}$  по Амурской области и Хабаровскому краю не различаются значимо для всех индексов. Коэффициенты вариации среднего максимума для  $DpRVI$  в Хабаровском крае и Амурской области были равны, соответственно 6,7 % и 4,4 %, для  $RVI$  – 9,1 % и 8,0 %,  $VH/VV$  – 11,7 % и 10,5 %. Аналогичные результаты наблюдаются для культур овса и залежных территорий.

Таблица 2

Характеристики временных рядов  $VI$  для отдельных полей с посевами сои в 2021 г в Хабаровском крае и Амурской области

Регион	Характеристики	$VI$		
		$DpRVI$	$RVI$	$VH/VV$
Хабаровский край	$\overline{VI_{max}} \pm \Delta\overline{VI_{max}}$	0,59±0,08	0,92±0,16	0,31±0,07
	$VAR_{VI}$	6,7	9,1	11,7
	$\overline{DOY_{max}} \pm \Delta\overline{DOY_{max}}$	263,4±8,2	261,0±21,3	260,7±21,4
	$VAR_{DOY}$	1,5	3,8	4,4
Амурская область	$\overline{VI_{max}} \pm \Delta\overline{VI_{max}}$	0,60±0,06	0,91±0,17	0,31±0,07
	$VAR_{VI}$	4,4	8,0	10,5
	$\overline{DOY_{max}} \pm \Delta\overline{DOY_{max}}$	261,5±15,0	257,0±24,0	256,1±27,2
	$VAR_{DOY}$	2,9	4,1	5,1

### Выводы

Временные ряды радиолокационных индексов  $DpRVI$ ,  $RVI$  и  $VH/VV$  для основных типов сельскохозяйственных земель юга Дальнего Востока имеют отличительные особенности и могут применяться в задачах классификации, моделирования урожайности, распознавания культур и прочих задачах цифрового земледелия. Было выявлено, что средние значения временных рядов для полей с соей, овсом и залежью имели характерную форму, при этом сходство между средними  $VI$  сохранялось для достаточно удаленных друг от друга регионов – Хабаровского края и Амурской области. Наиболее высокое сходство было отмечено для индекса  $DpRVI$  ( $d$  находилось в диапазоне от 0,24 до 0,45) в сравнении с  $RVI$  ( $d$  от 0,40 до 0,68) и  $VH/VV$  ( $d$  от 0,50 до 0,84). В результате проведенного исследования впервые было установлено, что индекс  $DpRVI$  оказался наиболее устойчивым для основных культур, а также залежных земель Хабаровского края и Амурской области. Значения коэффициентов вариации  $DpRVI$  по отдельным полям с одинаковыми с/х культурами были в 2-3 раза ниже, чем у радиолокационных индексов  $RVI$  и  $VH/VV$ .

Установлено, что средние значения максимума и дня наступления максимума в разных регионах схожи между собой. Вариабельность для  $DpRVI$  ниже, чем для  $RVI$  и  $VH/VV$ . В целом, использование  $DpRVI$  может являться хорошей альтернативой и дополнением к индексам, рассчитанным по мультиспектральным изображениям, в случае отсутствия снимков из-за облачности или иных причин.

### ***Благодарности***

Исследование выполнено при финансовой поддержке проекта РФФ № 24-11-20030.

### **БИБЛИОГРАФИЧЕСКИЙ СПИСОК**

1. Миклашевич Т.С., Барталев С.А., Плотников Д.Е. Интерполяционный алгоритм восстановления длинных временных рядов данных спутниковых наблюдений растительного покрова // *Современные проблемы дистанционного зондирования Земли из космоса*. – 2019. – Т.16. – С. 143-154.
2. 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.
3. Ratha D., Mandal D., Kumar V., et al. A Generalized Volume Scattering Model-Based Vegetation Index From Polarimetric SAR Data // *IEEE Geoscience and Remote Sensing Letters*. – 2019. – Vol. 16(11). – Pp. 1791-1795.
4. Mandal D., Ratha D., Bhattacharya A., et al. A Radar Vegetation Index for Crop Monitoring Using Compact Polarimetric SAR Data // *IEEE Transactions on Geoscience and Remote Sensing*. – 2020. – Vol. 58(9). – Pp. 6321-6335.
5. Trudel M., Charbonneau F., Leconte R. Using RADARSAT-2 polarimetric and ENVISAT-ASAR dual-polarization data for estimating soil moisture over agricultural fields // *Canadian Journal of Remote Sensing*. – 2012. – Vol. 38(4). – Pp. 514-527.
6. 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.
7. Nasirzadehdizaji R., Balik Sanli F., Abdikan S., et al. Sensitivity Analysis of Multi-Temporal Sentinel-1 SAR Parameters to Crop Height and Canopy Coverage // *Applied Sciences*. – 2019. – Vol 9. – Pp. 655.
8. Chang J.G., Shoshany M., Oh Y. Polarimetric Radar Vegetation Index for Biomass Estimation in Desert Fringe Ecosystems // *IEEE Transactions on Geoscience and Remote Sensing*. – 2018. – Vol. 56(12). – Pp. 7102-7108.
9. Periasamy S. Significance of dual polarimetric synthetic aperture radar in biomass retrieval: An attempt on Sentinel-1 // *Remote Sensing of Environment*. – 2018. – Vol. 217. – Pp. 537-549.
10. 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.
11. Дубровин К.Н., Степанов А.С., Верхотуров А.Л., Асеева Т.А. Идентификация сельскохозяйственных культур с использованием радарных изображений // *Информатика и автоматизация*. – 2022. – № 21(2). – С. 405-426.
12. Dubrovin K., Stepanov A., Verkhoturov A. Cropland Mapping Using Sentinel-1 Data in the Southern Part of the Russian Far East // *Sensors*. – 2023. – Vol. 23(18). – Pp. 7902.

© А. Л. Верхотуров, А. С. Степанов, А. А. Сорокин, А. С. Бордаков, 2024