


Анализ временных рядов радиолокационных данных Sentinel-1 для мониторинга сельскохозяйственных культур Хабаровского края

А. Л. Верхотуров^{1*}, А. А. Холодков²

Докладчик: Верхотуров А.Л., С.н.с.

e-mail: andrey@ccfebras.ru

¹ - ВЦ ДВО РАН (г. Хабаровск) 

² - ДВ НИИСХ (с. Восточное) 



Цель исследования: использование и адаптация методов обработки временных рядов радиолокационных изображений в задачах мониторинга развития посевов на территории юга Хабаровского края

Задачи:

- По данным радиолокационной съемки миссии *Sentinel-1A/B* и оптических данных спутника *Sentinel-2* в период с апреля по октябрь 2021 г. построить временные ряды вегетационных индексов **VH/VV**, **RVI**, **DpRVI** и **NDVI** сельскохозяйственных культур Хабаровского края;
- Используя коэффициент вариации, провести оценку пространственной устойчивости вегетационных индексов **VH/VV**, **RVI**, **DpRVI** и **NDVI** с/х полей;
- По данным радиолокационной съемки миссии *Sentinel-1A/B* построить временные ряды поляриметрических характеристик (**Энтропия Шеннона**, **степень линейной поляризации**, **угол ориентации**, **угол эллиптичности**) и **интерферометрической когерентности**;
- Провести анализ и оценку возможности использования **интерферометрической когерентности** и **поляриметрических характеристик** для сельскохозяйственных угодий.

Территория исследования:

Сельскохозяйственные поля
Хабаровского района Хабаровского
края

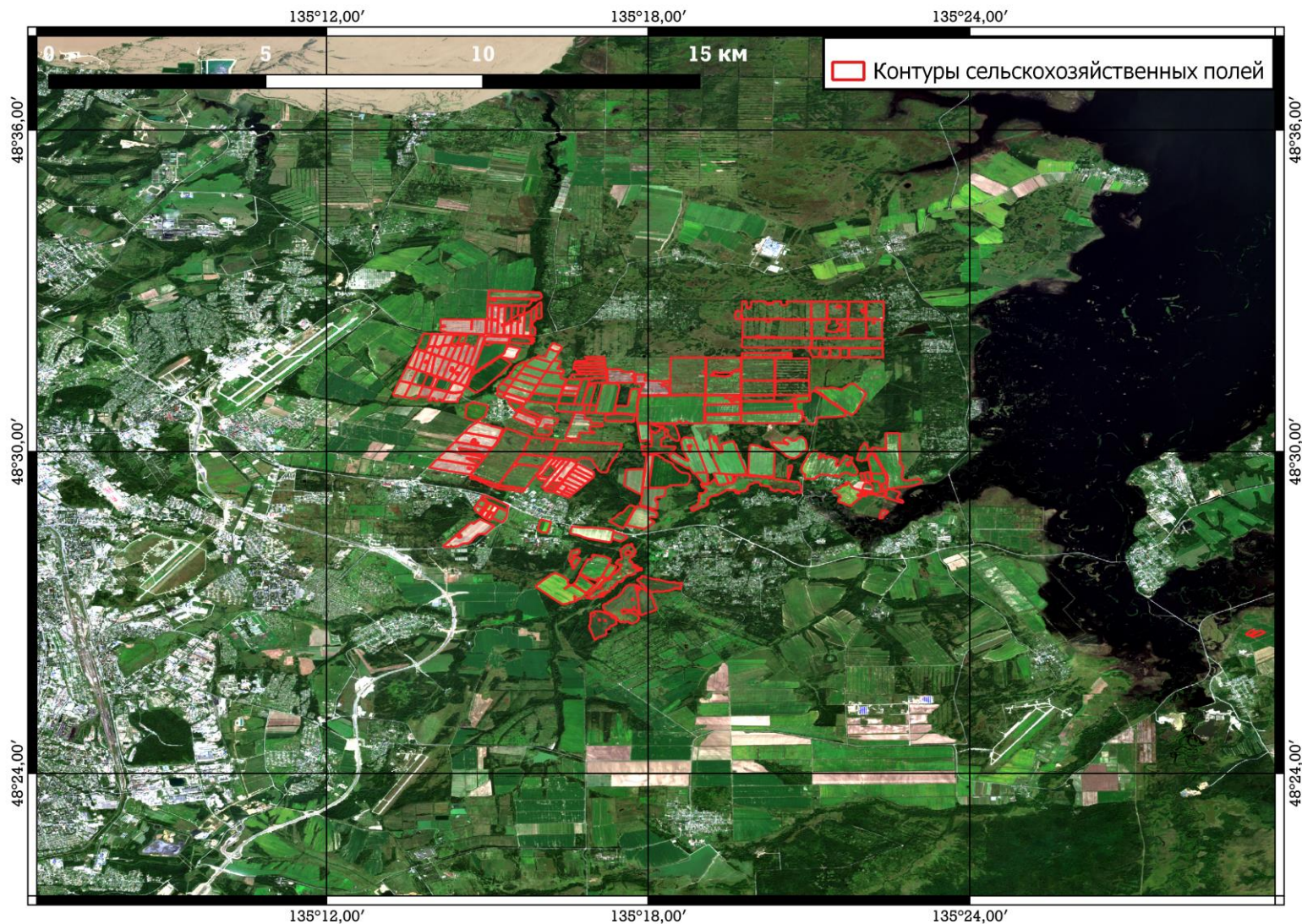
2021 год

Залежь: 66 полей

Гречиха: 14 полей

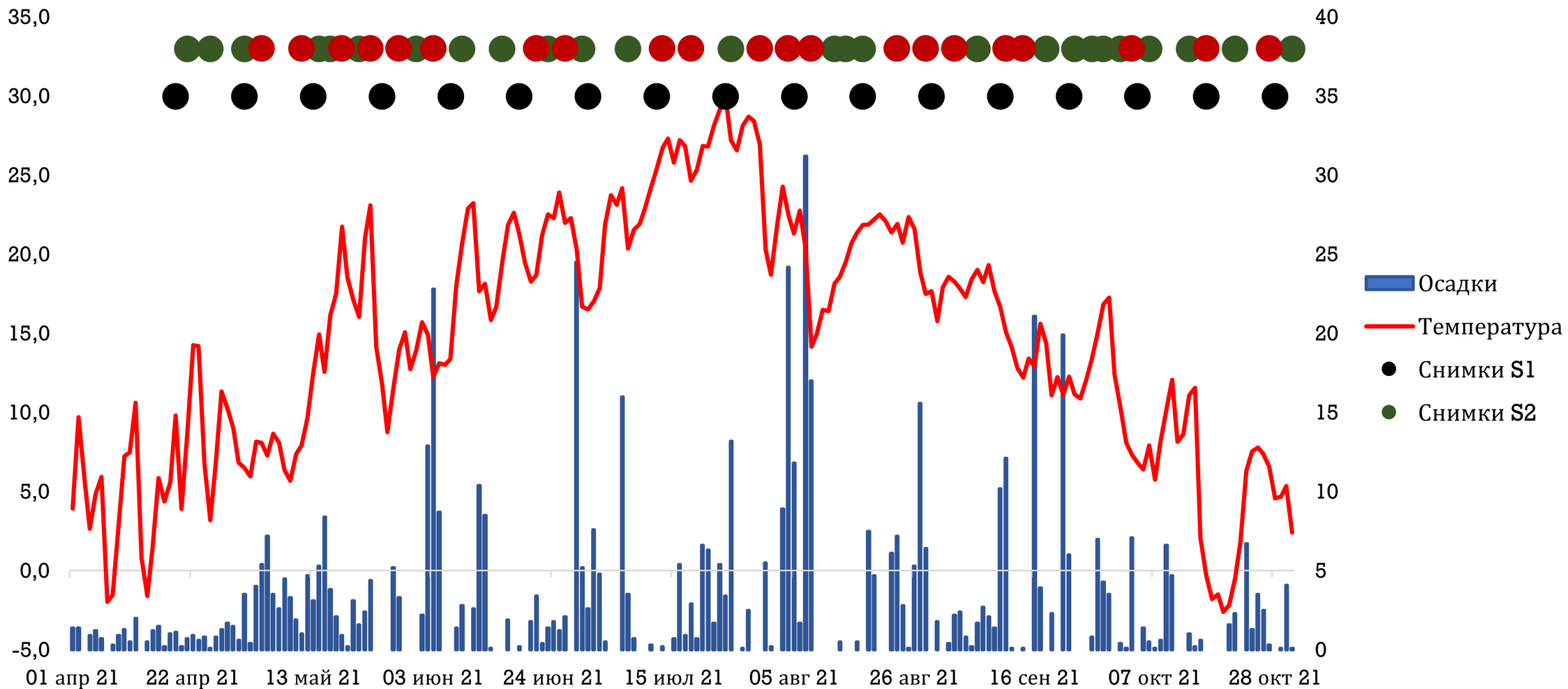
Овес: 6 полей

Соя: 42 поля

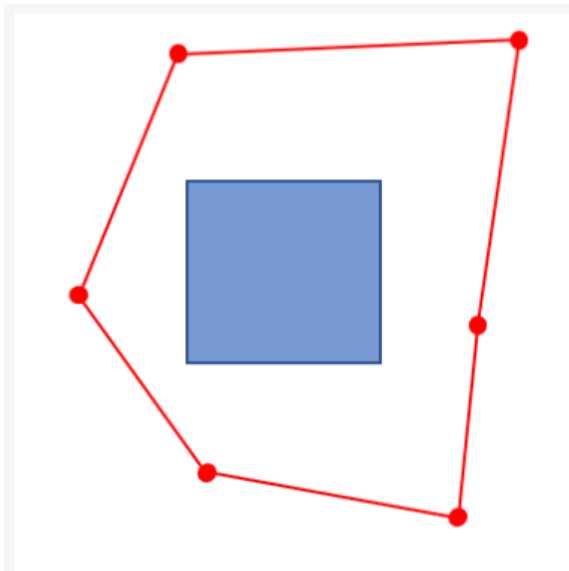


Band	C (center frequency of 5,405 GHz)
Mode	Interferometric Wide Swath
Resolution	10m x 10m (after Multilook processing)
Temporal resolution	12 days
Orbit	Descending
Polarization	VH, VV
Incidence angle	30° - 46°

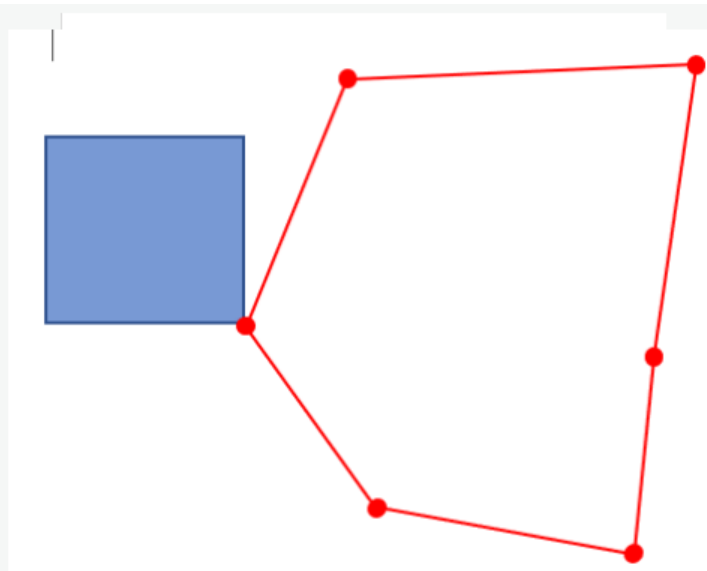
Метеостанция Аэропорт, Хабаровск 2021



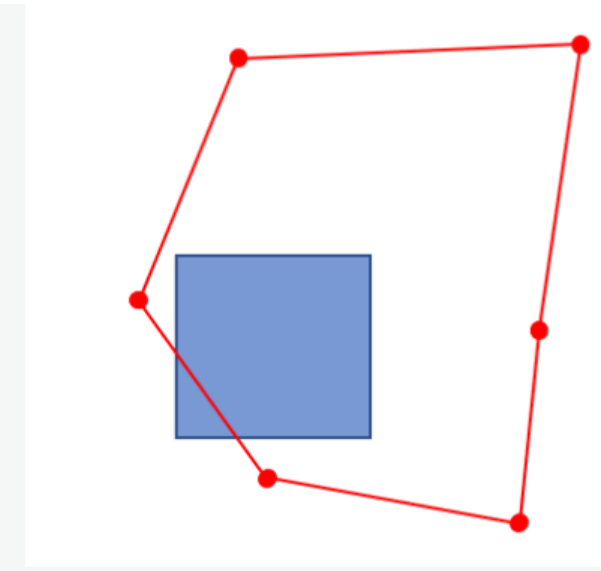
Материалы и методы исследования



`object.contains(other)`



`object.touches(other)`



`object.intersects(other)`

Не учитывалось влияние на величину обратного рассеяния радиолокационного сигнала изменение влажности почв и осадков

Материалы и методы исследования

При радиолокационной съёмке отражающая способность зондируемой поверхности характеризуется безразмерным коэффициентом обратного рассеяния, который представляет собой удельную эффективную площадь рассеяния (УЭПР), σ_0^* .

Rough Surface Scattering

$$|S_{WV}| > |S_{HH}| > |S_{HV}| \text{ or } |S_{VH}|$$

Double Bounce Scattering

$$|S_{HH}| > |S_{WV}| > |S_{HV}| \text{ or } |S_{VH}|$$

Volume Scattering

Main source of $|S_{HV}|$ and $|S_{VH}|$

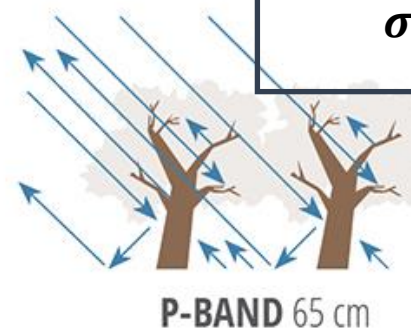
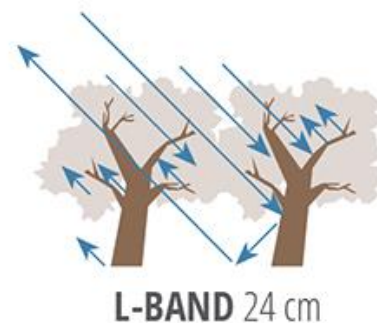
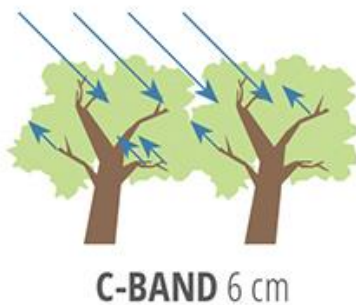
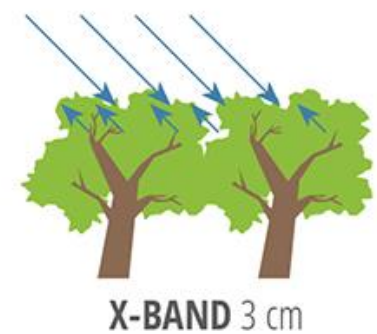
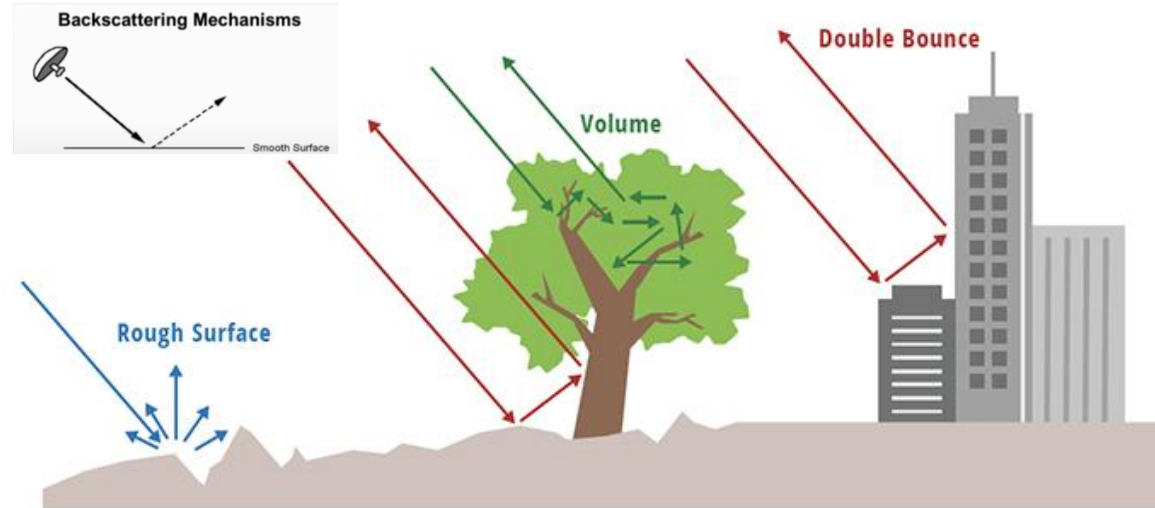
$$\sigma = \frac{4\pi \cdot P_s}{W}, [m^2]$$

$$\sigma_0 = \frac{\sigma}{p_x p_y}$$

$$\sigma_{0[dB]} = 10 \lg \sigma_0 [dB]$$

P_s [Вт] – мощность сигнала, рассеянного объектом в направлении радиолокатора;

W [Вт/м²] – плотность потока мощности сигнала, облучающего объект.



*Flores-Anderson A. I., Herndon K. E., Thapa R. B., Cherrington E. SAR Handbook: Comprehensive Methodologies for Forest Monitoring and Biomass Estimation.

Радиолокационные вегетационные индексы

IEEE TRANSACTIONS ON GEOSCIENCE AND REMOTE SENSING, VOL. 33, NO. 4, JULY 1995

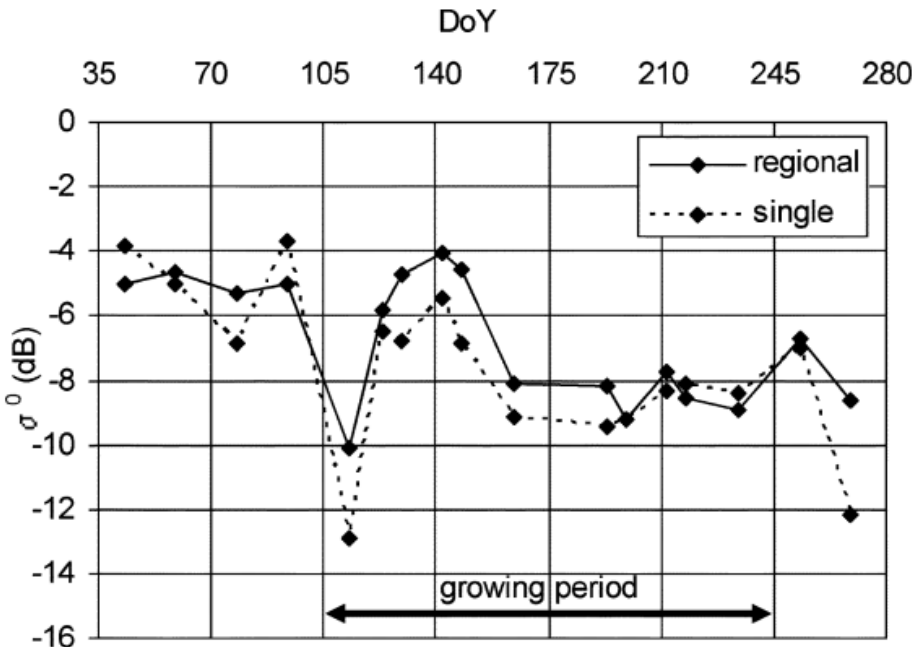
Measuring Soil Moisture with Imaging Radars

Pascale C. Dubois, Jakob van Zyl, and Ted Engman



$$\frac{\sigma_{VH}^0}{\sigma_{VV}^0}$$

Ground Range Detected
- High Resolution -
- Medium Resolution -



Kim Y.J., Van Zyl J. A time-series approach to estimate soil moisture using polarimetric radar data // IEEE Trans. Geosci. Remote Sens. – 2009. – Vol. 47, № 8. - Pp. 2519–2527.

$$RVI = \frac{8 \cdot \sigma_{VH}^0}{\sigma_{HH}^0 + \sigma_{VV}^0 + 2 \cdot \sigma_{VH}^0}$$

$RVI = \frac{8 \cdot \sigma_{VH}^0}{\sigma_{HH}^0 + \sigma_{VV}^0 + 2 \cdot \sigma_{VH}^0}$

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. no. 4. Pp. 514-527.

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.

$$RVI = \frac{4 \cdot \sigma_{VH}^0}{\sigma_{VH}^0 + \sigma_{VV}^0}$$

Ground Range Detected
- High Resolution -
- Medium Resolution -

IEEE TRANSACTIONS ON GEOSCIEN

C-Band Polarimetric Based on

Xavier Blaes, Pierre De



Радиолокационные вегетационные индексы

Single Look
Complex

$$C_2 = \begin{bmatrix} C_{11} & C_{12} \\ C_{21} & C_{22} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} \langle |S_{VV}|^2 \rangle & \langle S_{VV} S_{VH}^* \rangle \\ \langle S_{VH} S_{VV}^* \rangle & \langle |S_{VH}|^2 \rangle \end{bmatrix}$$

$$m = \frac{\sqrt{4|C_2|}}{\sqrt{(Tr(C_2))^2}} \quad \beta = \frac{\lambda_1}{\lambda_1 + \lambda_2}$$

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

$$D_p RVI = 1 - m \cdot \beta = 1 - \frac{\sqrt{4|C_2|}}{\sqrt{(Tr(C_2))^2}} \cdot \frac{\lambda_1}{\lambda_1 + \lambda_2}$$

* - комплексное сопряжение;

|| - среднее по всем элементам;

Tr - сумма диагональных элементов матрицы;

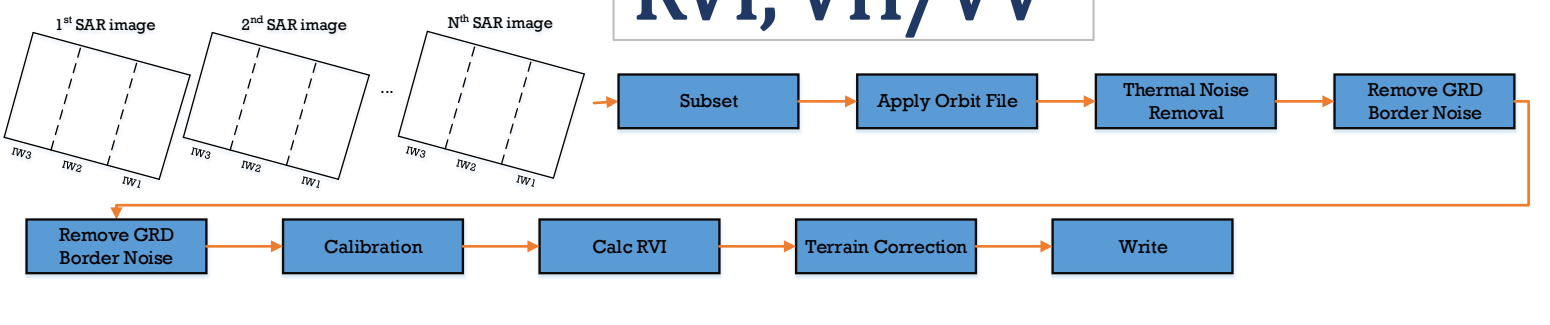
m - степень поляризации ($0 \leq m \leq 1$), которая определяется как отношение (средней) интенсивности поляризованной части волны к (средней) общей интенсивности волны;

β - мера доминирующего механизма рассеяния, которая определяется из разложения матрицы C_2 на два неотрицательных собственных значения.

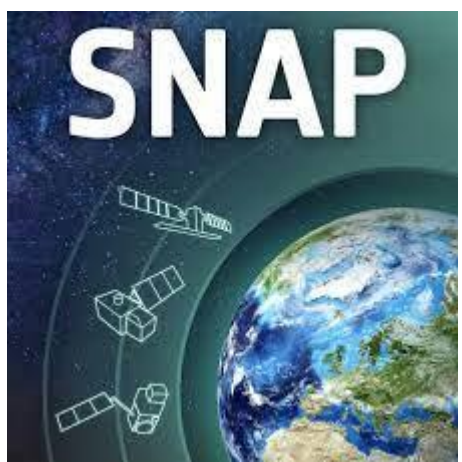
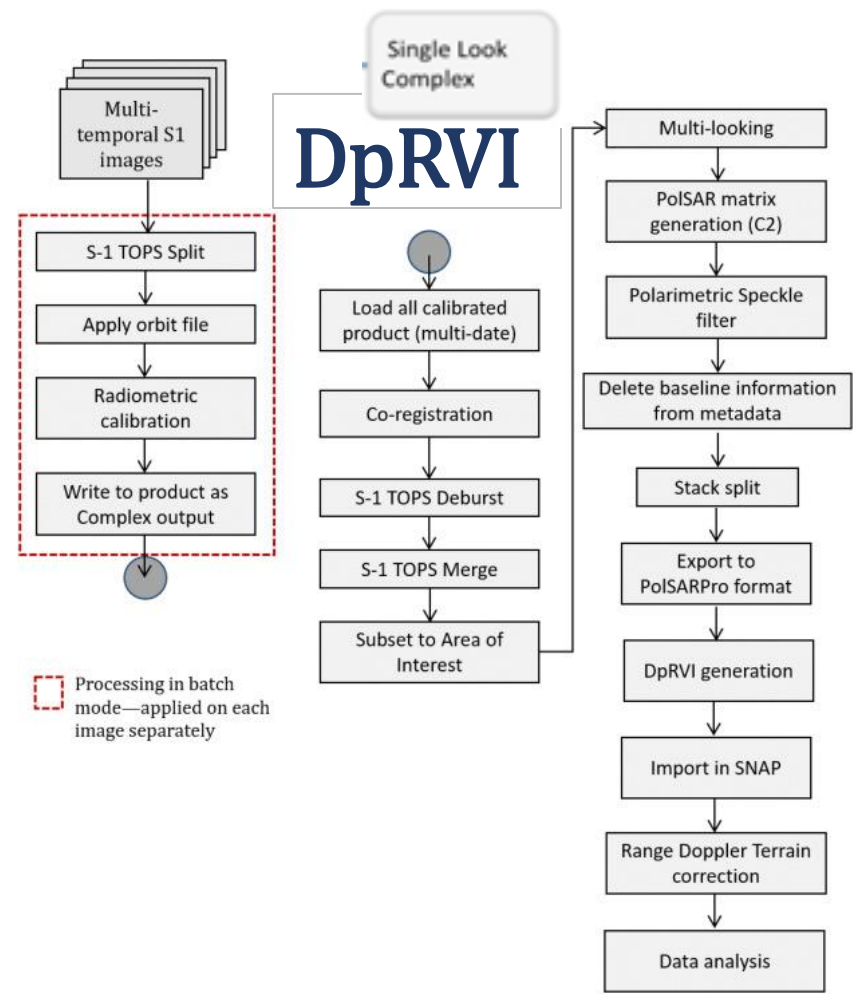
Схема обработки радиолокационных индексов

RVI, VH/VV

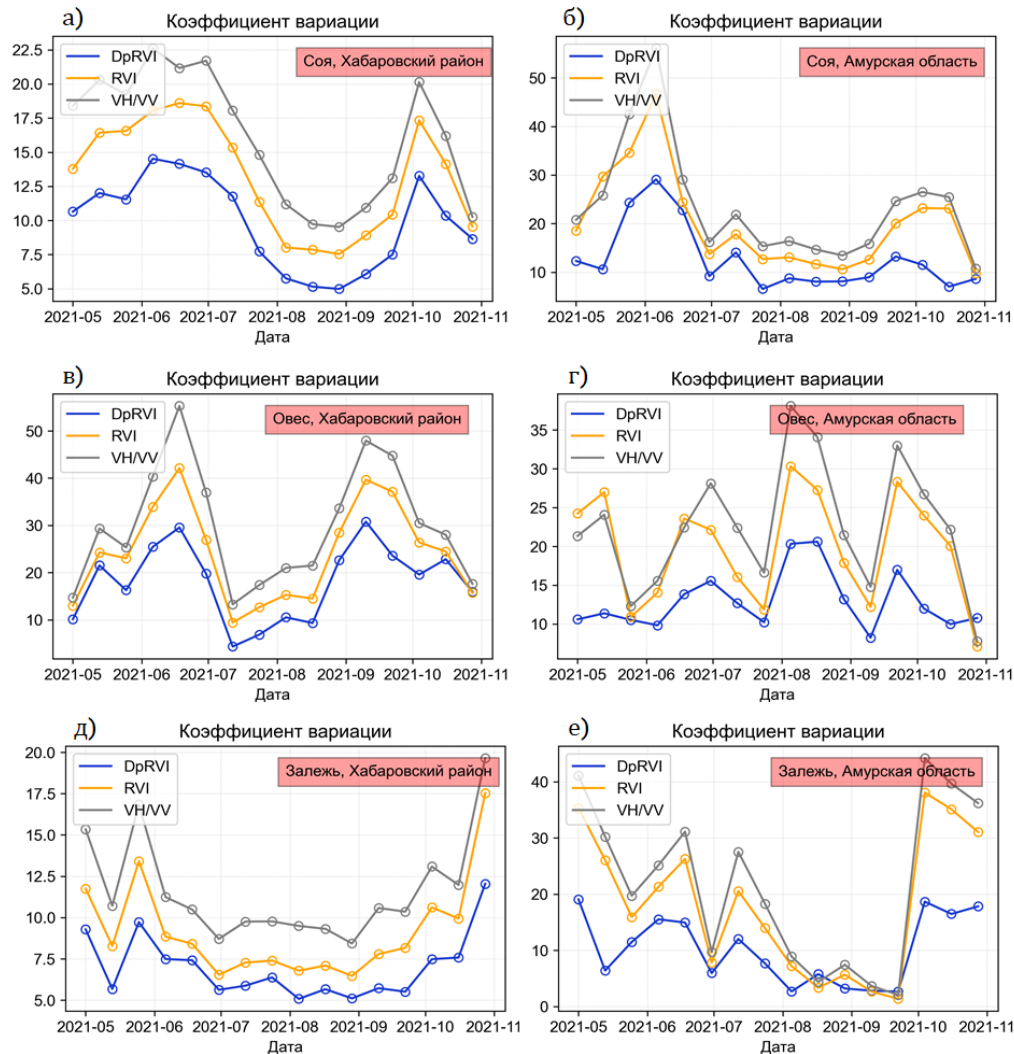
Ground Range Detected
- High Resolution -
- Medium Resolution -



DpRVI



Коэффициент вариации временных рядов вегетационных индексов



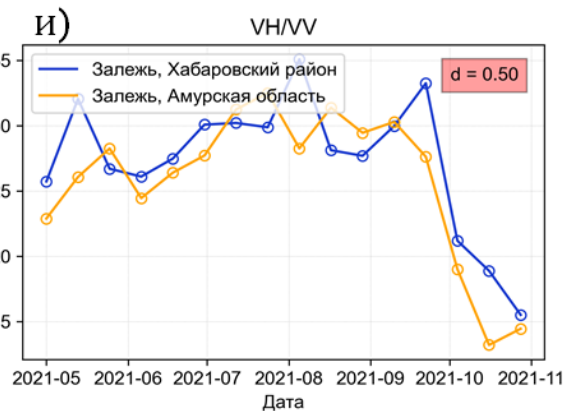
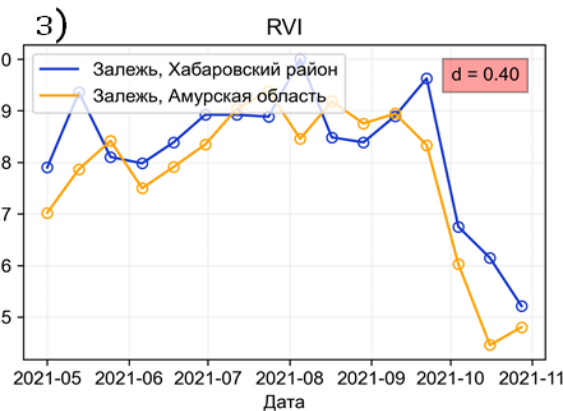
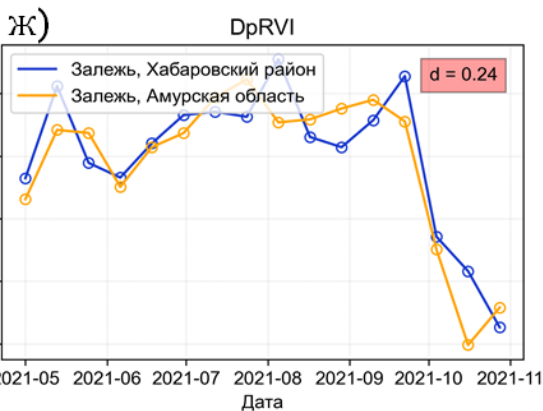
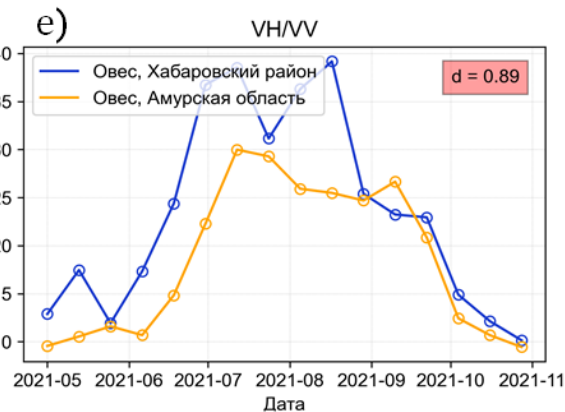
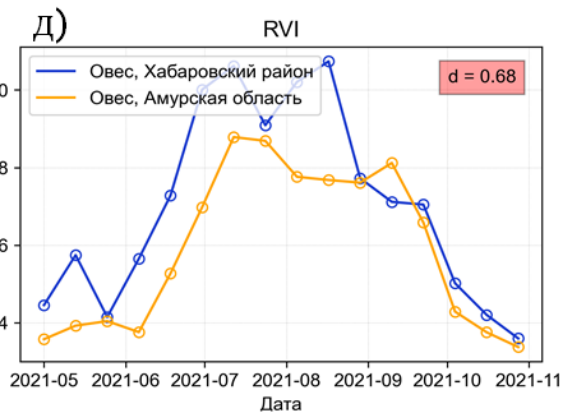
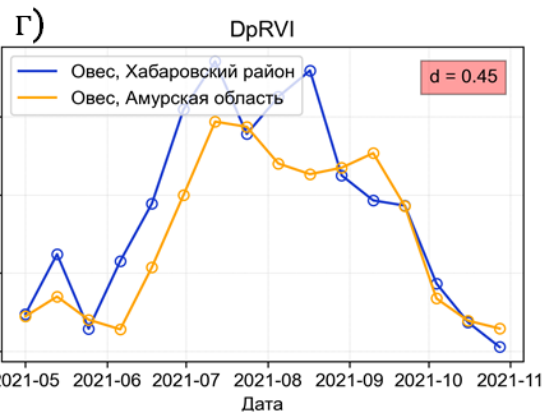
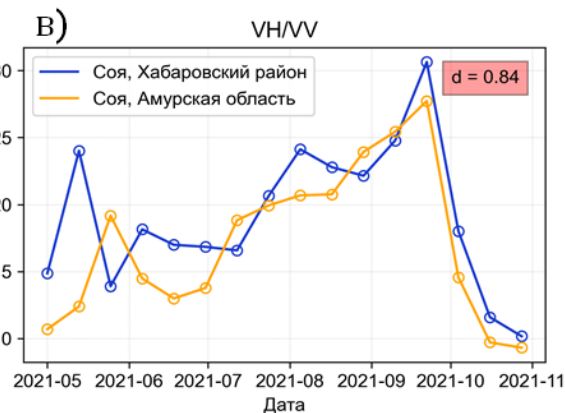
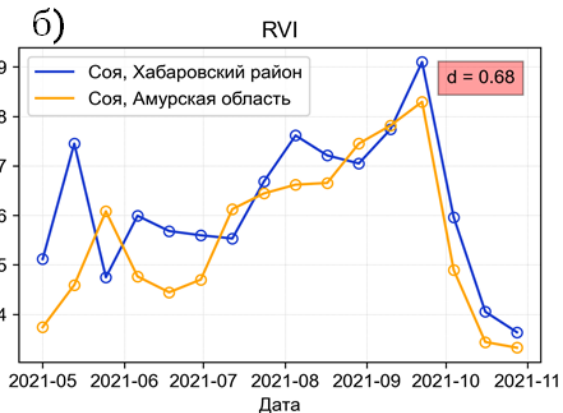
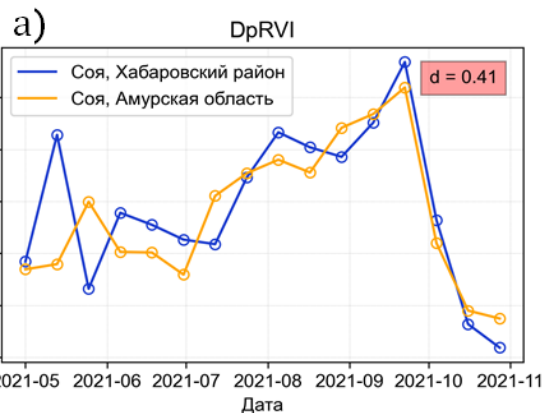
$$VAR(VI)_i = \sum_{j=1}^n \frac{\sigma_j}{\overline{VI}_j} \cdot 100\%$$

$$i \in (1..m)$$

$$j \in (1..n)$$

Значения коэффициентов вариации **DpRVI** для отдельных полей всего периода наблюдения ниже, чем для индексов **RVI** и **VH/VV** соответственно, в среднем на **5-8%** и **10-15%**.

Евклидово расстояние



$$D = \sum_{j=1}^m \left(\frac{\overline{VI}_j^{KHAB}}{\overline{VI}^{KHAB}} - \frac{\overline{VI}_j^{AMU}}{\overline{VI}^{AMU}} \right)^2$$

$j \in (1..n)$

Значения меры близости для индекса **DpRVI** были минимальны, а для **VH/VV** – максимальны!!!

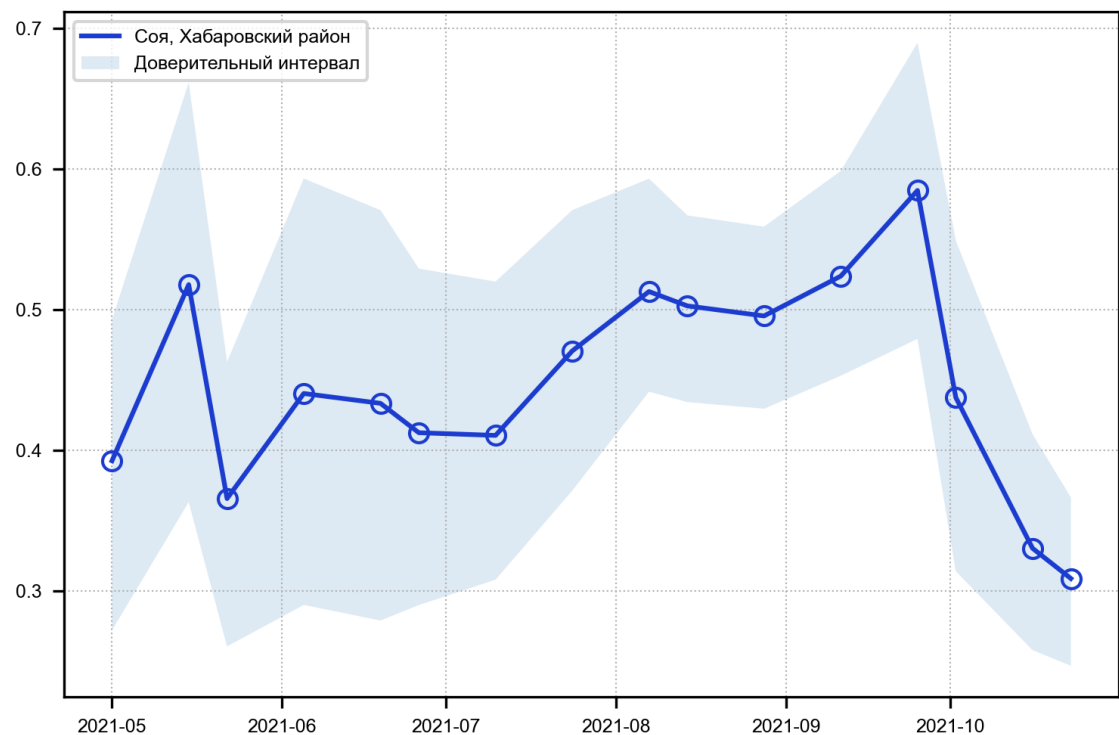
Поля с соей
 $d = 0,41; 0,68; 0,84,$
DpRVI, RVI, VH/VV.

Поля с овсом
0,45; 0,68; 0,89
DpRVI, RVI, VH/VV.

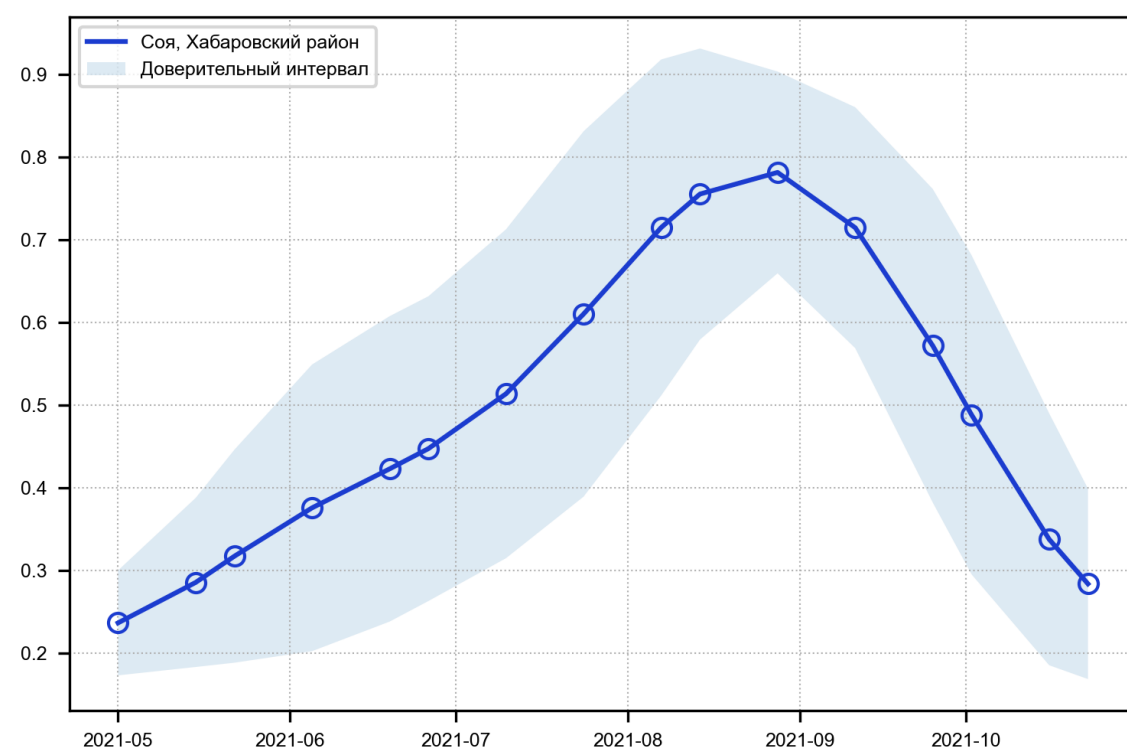
Поля с залежью
0,24; 0,40; 0,50
DpRVI, RVI, VH/VV.

DpRVI vs NDVI

DpRVI



NDVI

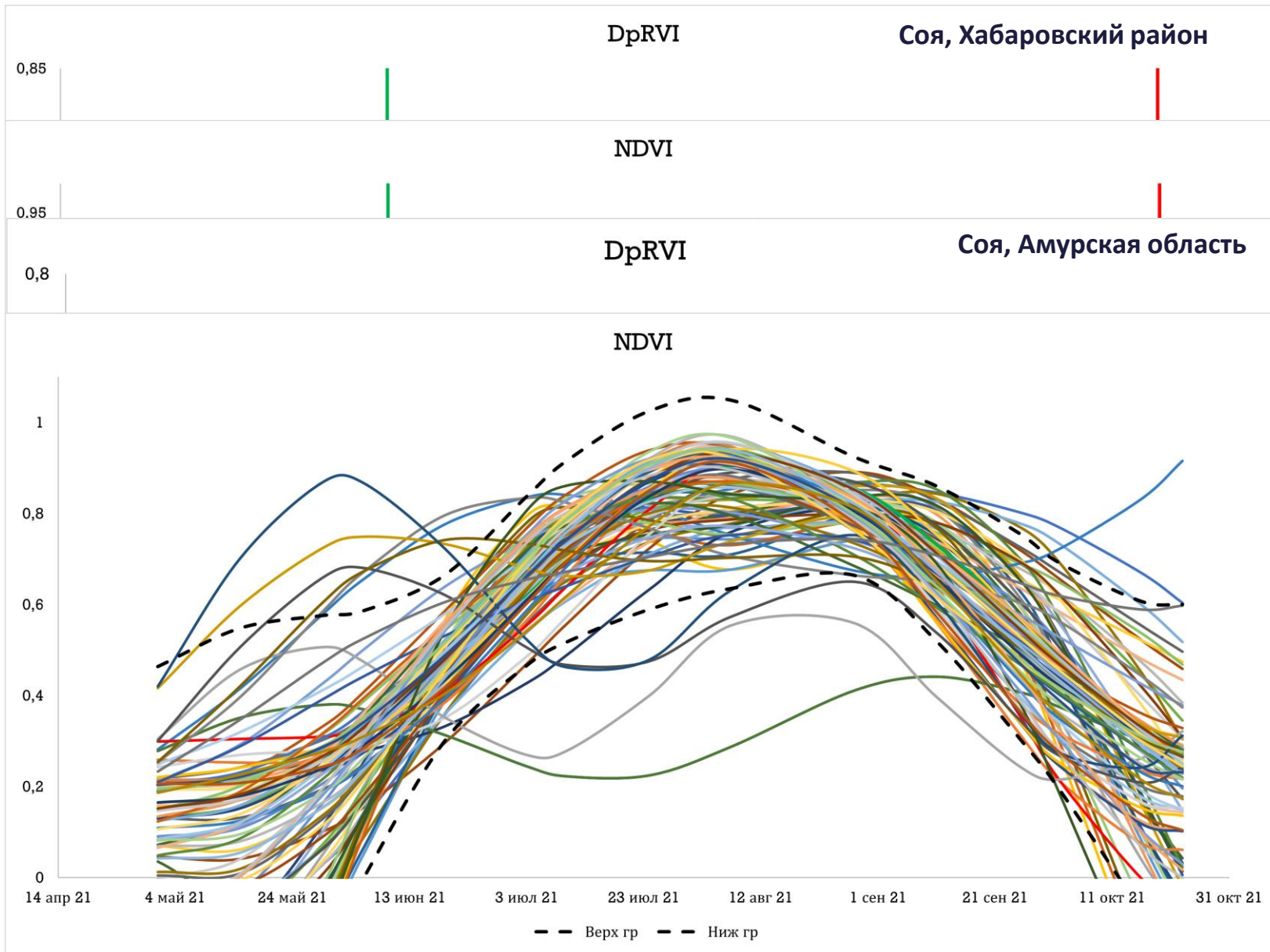


Характеристики временных рядов

Соя

Регион	Характеристики	VI			
		DpRVI	RVI	VH/VV	NDVI
Хабаровский край	$\overline{VI_{max}} \pm \Delta \overline{VI_{max}}$	0,59±0,08	0,92±0,16	0,31±0,07	0,80±0,11
	VAR_{VI}	6,7	9,1	11,7	6,8
	$\overline{DOY_{max}} \pm \Delta \overline{DOY_{max}}$	263,4±8,2	261,0±21,3	260,7±21,4	238,2±15,0
	VAR_{DOY}	1,5	3,8	4,4	3,4
Амурская область	$\overline{VI_{max}} \pm \Delta \overline{VI_{max}}$	0,60±0,06	0,91±0,17	0,31±0,07	0,86±0,15
	VAR_{VI}	4,4	8,0	10,5	8,6
	$\overline{DOY_{max}} \pm \Delta \overline{DOY_{max}}$	261,5±15,0	257,0±24,0	256,1±27,2	224,5±24,6
	VAR_{DOY}	2,9	4,1	5,1	5,5

Основные результаты



Двухвыборочный t-тест Стьюдента

$$t_p(VI)_i = \left| \frac{1}{n} \cdot \sum_{j=1}^n (VI_j - \bar{VI})^2 \right| / (n - 1)$$

$$i \in (1..m)$$

Доверительный интервал

$$(\bar{VI} - t_p(VI)_i \cdot \sigma_i; \bar{VI} + t_p(VI)_i \cdot \sigma_i)$$

где

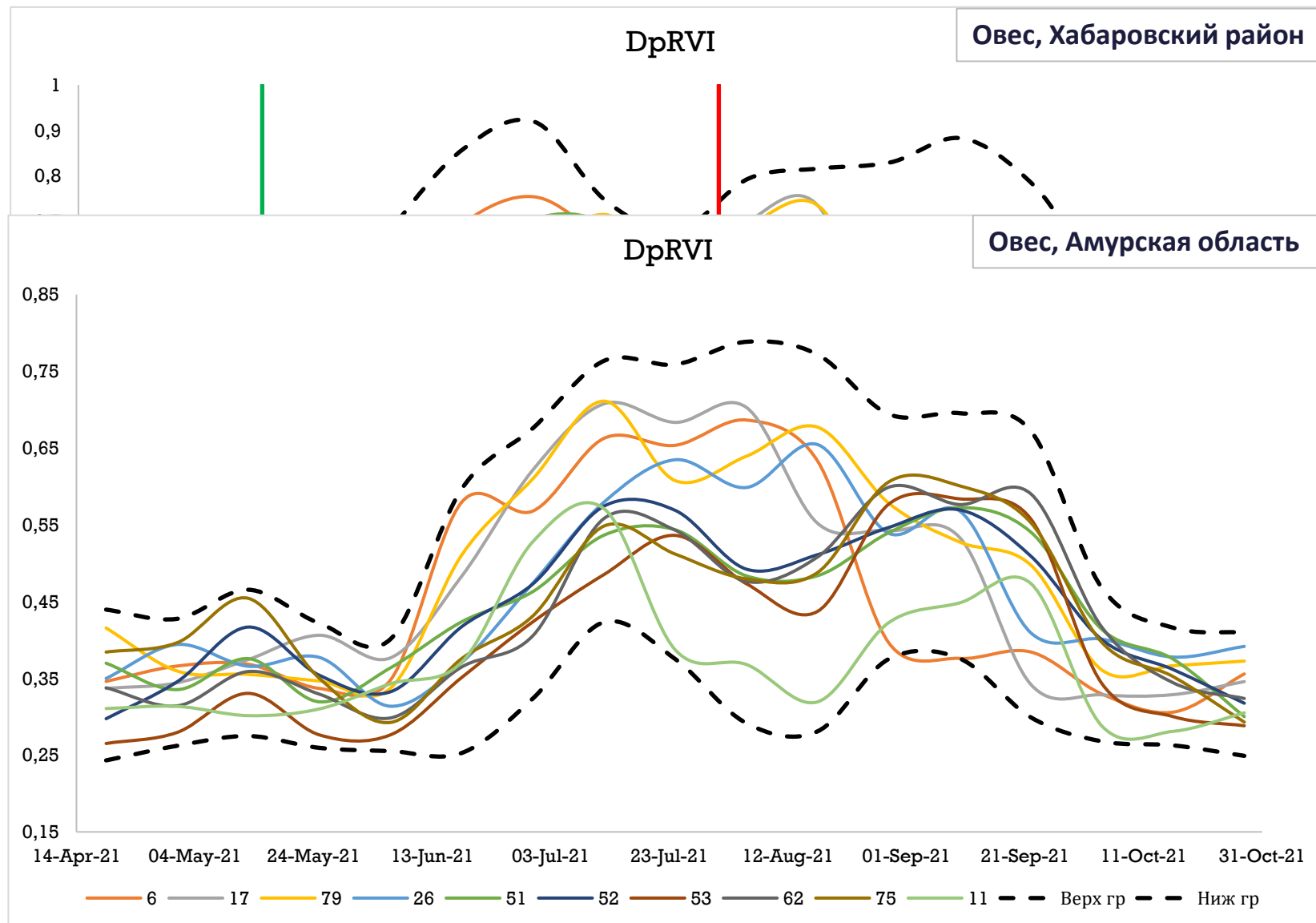
VI_j – значения радарного вегетационного индекса;

n – количество с/х полей с одной и той же культурой;

m – количество радарных снимков Sentinel-1;

σ_j – стандартное отклонение величины VI_j .

Основные результаты



Двухвыборочный t-тест Стьюдента

$$t_p(VI)_i = \left| \frac{1}{n} \cdot \sum_{j=1}^n (VI_j - \bar{VI})^2 \right| / (n - 1)$$

$$i \in (1..m)$$

Доверительный интервал

$$(\bar{VI} - t_p(VI)_i \cdot \sigma_i; \bar{VI} + t_p(VI)_i \cdot \sigma_i)$$

где

VI_j – значения радарного вегетационного индекса;

n – количество с/х полей с одной и той же культурой;

m – количество радарных снимков Sentinel-1;

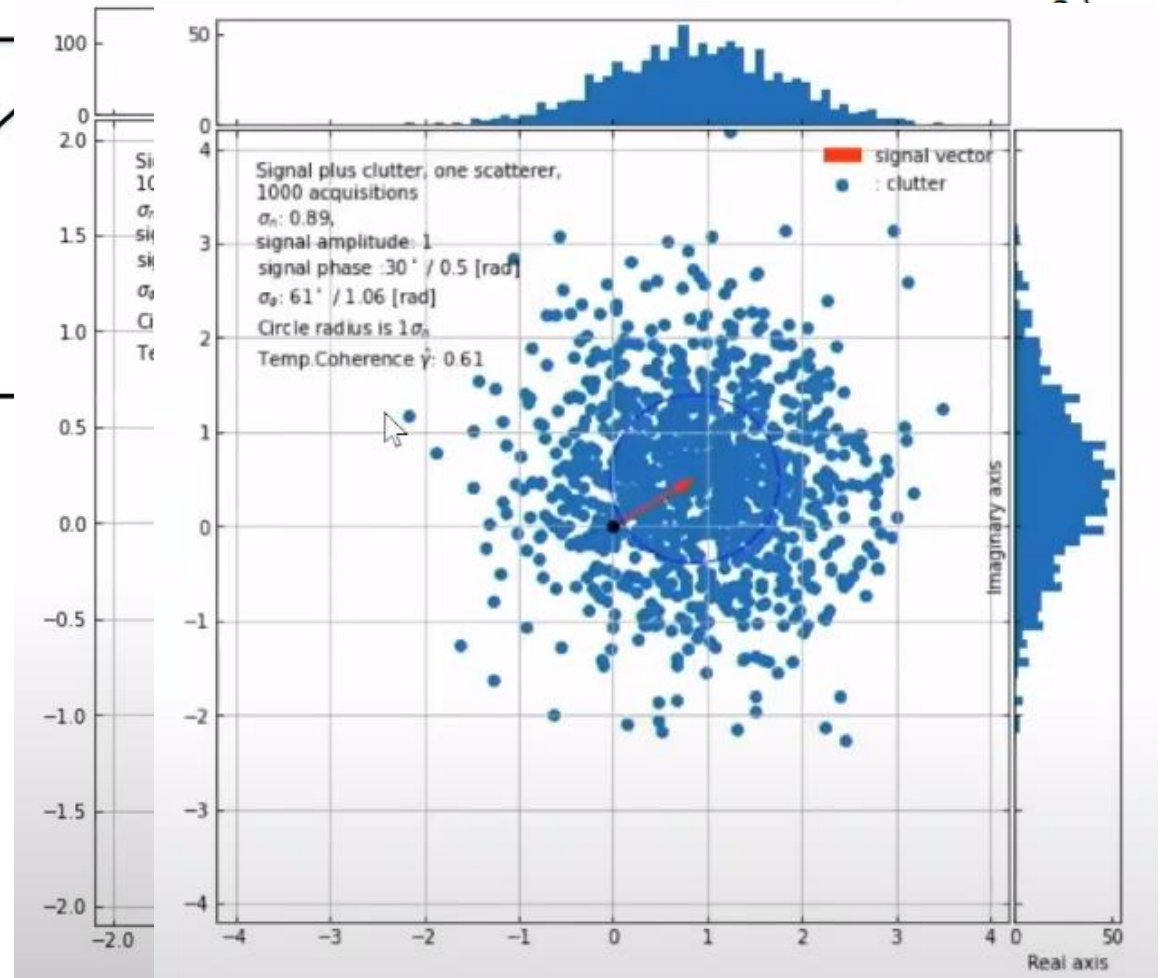
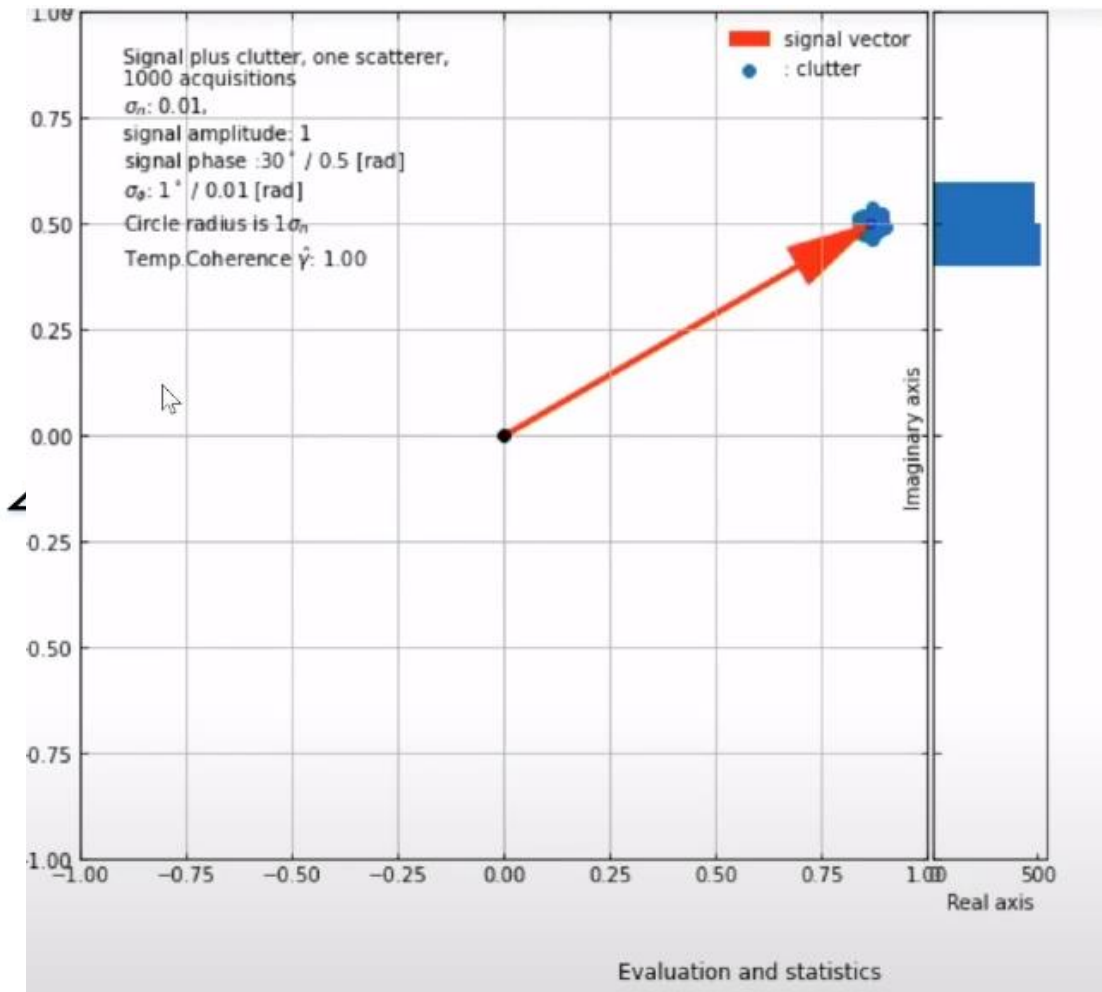
σ_j – стандартное отклонение величины VI_j .

Интерферометрическая когерентность

Интерферометрическая когерентность двух комплексных радиолокационных изображений z_1 и z_2 определяется как амплитуда нормализованного комплексного коэффициента корреляции:

где $\langle . \rangle$ - операция усреднения; * - операция комплексного сопряжения.

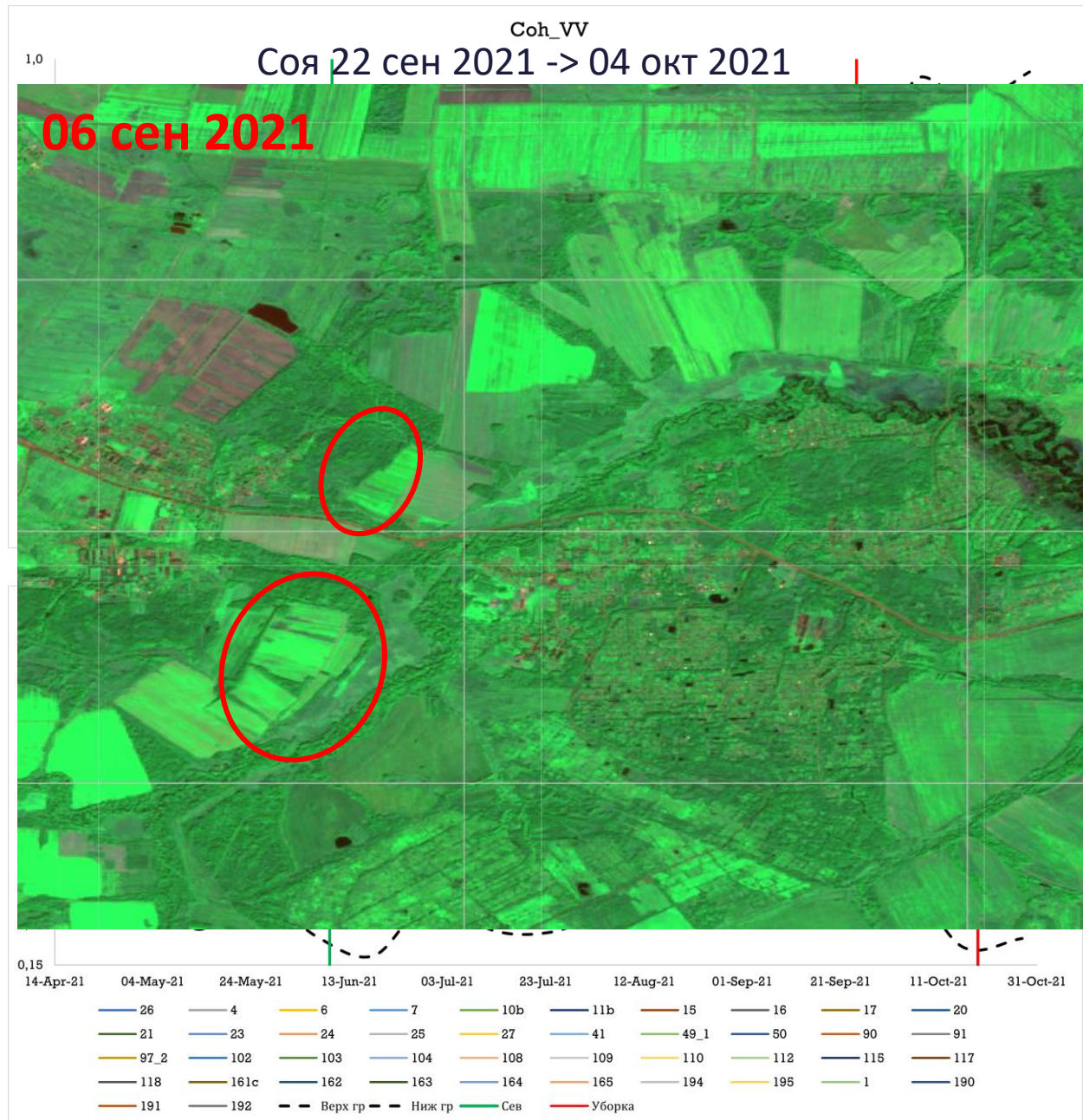
$$\gamma = \frac{\left| \langle z_1 \cdot z_2^* \rangle \right|}{\sqrt{\langle |z_1|^2 \rangle \langle |z_2|^2 \rangle}}$$



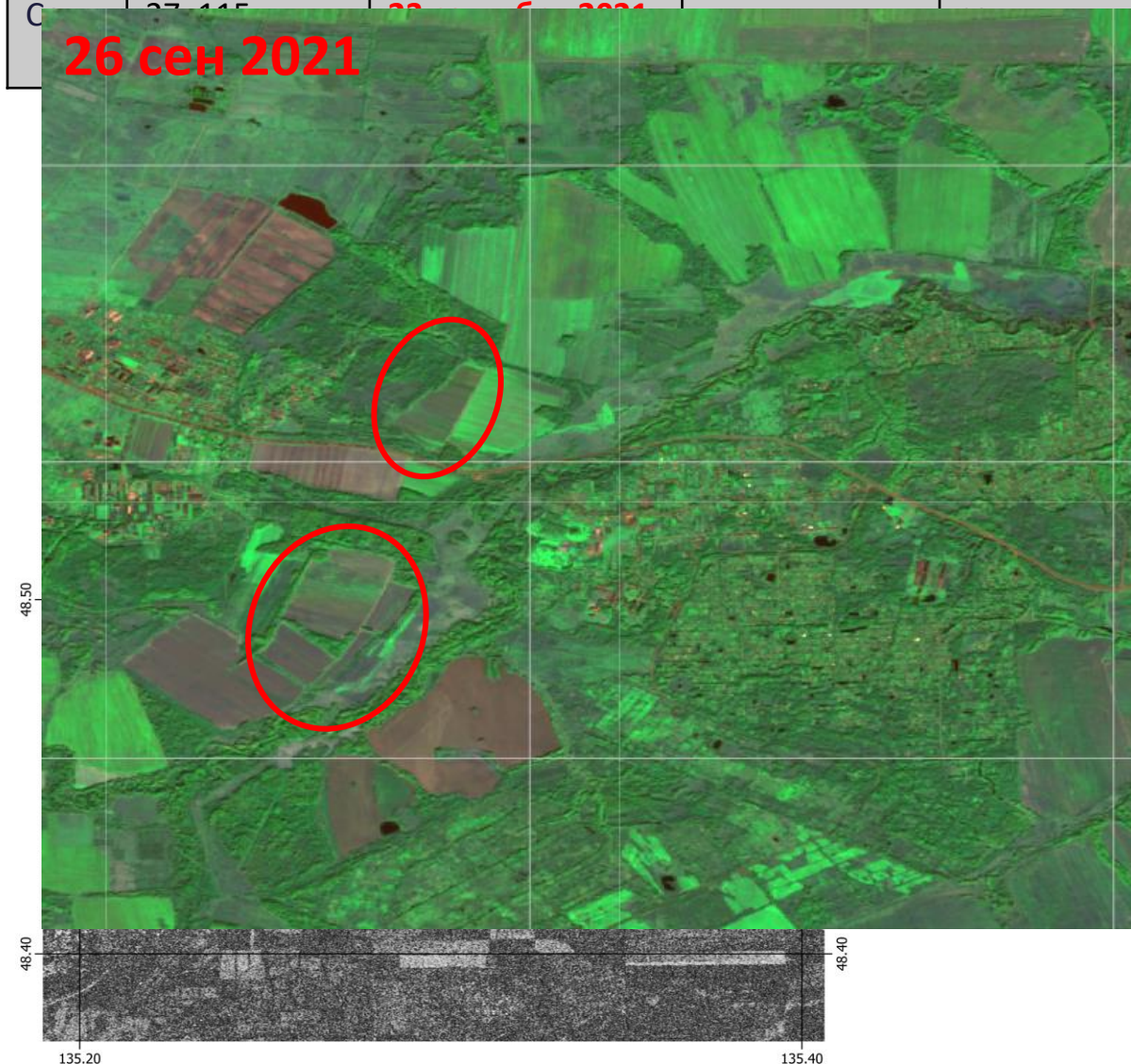
Интерферометрическая когерентность



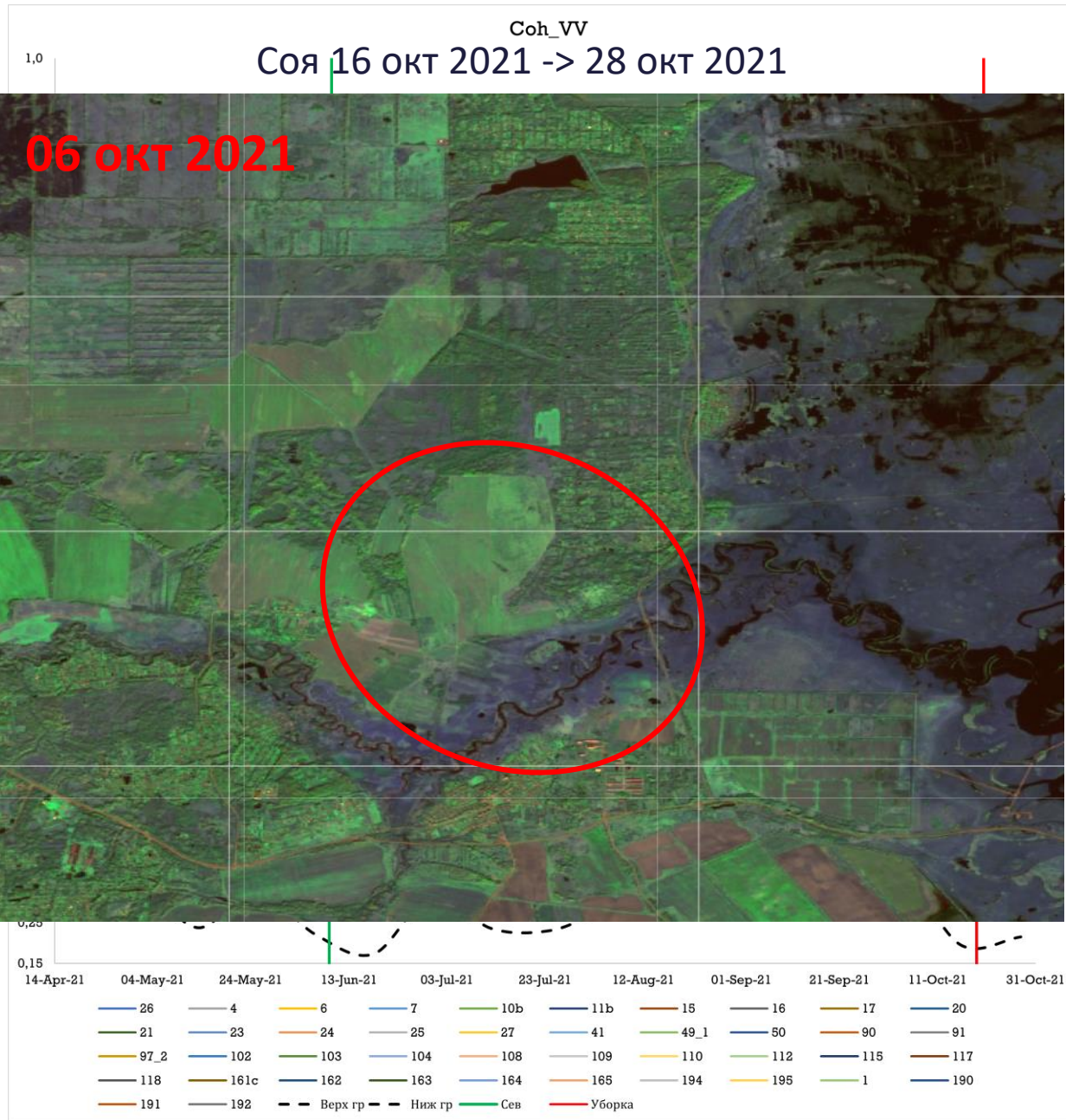
Основные результаты



Культура	Номера с/х полей	Дата уборки (по материалам)	Дата уборки по данным Sentinel-1	Дата уборки по данным Sentinel-2
С	11b, 15, 26, 27, 41, 49_1, 50, 90, 91, 97_2, 102, 103, 104, 108, 109, 110, 112, 115, 117, 118, 161c, 162, 163, 164, 165, 194, 195, 1, 190	22 сен – 04 окт	22 сен – 04 окт	06 сен – 26



Основные результаты



Культура	Номера с/х полей	Дата уборки (по материалам)	Дата уборки по данным Sentinel-1	Дата уборки по данным Sentinel-2
Соя	1, 6, 118, 192, 194, 195	19 октября 2021	16 окт – 24 окт	06 окт – 21 окт

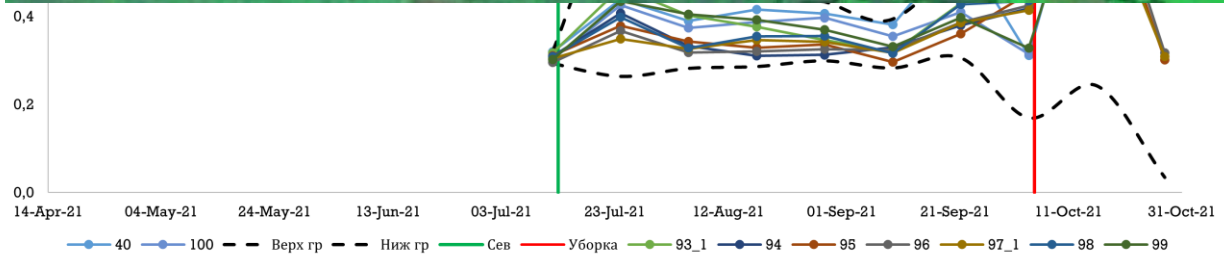


Основные результаты

Культура	Номера с/х полей	Дата уборки	Дата уборки по данным Sentinel-1	Дата уборки по данным Sentinel-2
----------	------------------	-------------	----------------------------------	----------------------------------

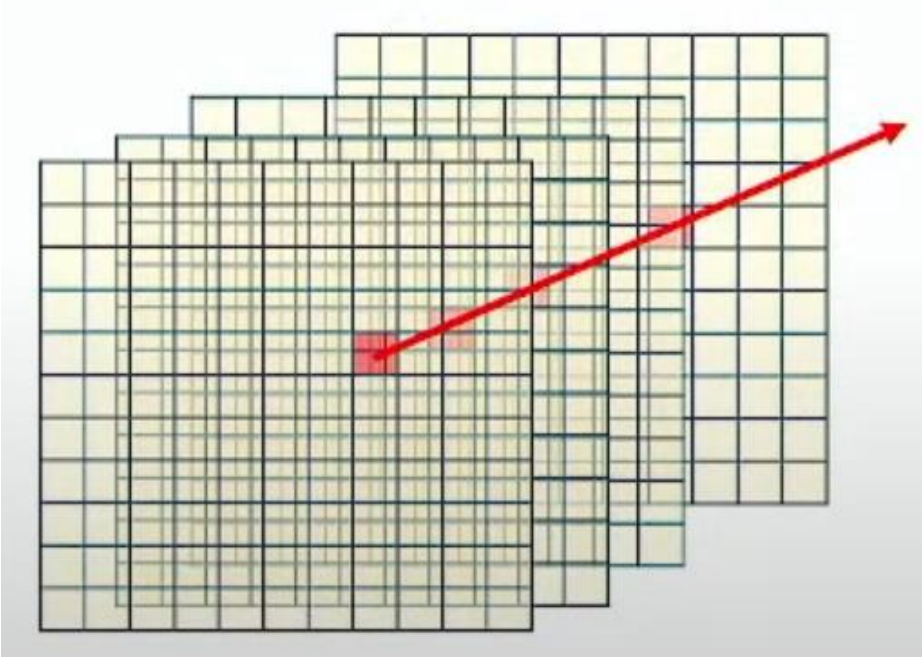
Гречи	40, 99, 100	Работы велись с 29 сен по 05 окт	04 окт – 16 окт	26 сен – 06 окт
-------	-------------	----------------------------------	-----------------	-----------------

Coh_VV
Гречиха 04 окт 2021 -> 16 окт 2021



Материалы и методы исследования

Ковариационная матрица 2×2 C_2 вычисляется на основе данных вертикальной поляризации при передаче (V) и двойной поляризации при приеме (V и H) спутника Sentinel-1 и имеет вид:



$$C_2 = \begin{bmatrix} C_{11} & C_{12} \\ C_{21} & C_{22} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} |S_{vv}|^2 & S_{vv}S_{vh}^* \\ S_{vh}S_{vv}^* & |S_{vh}|^2 \end{bmatrix}$$

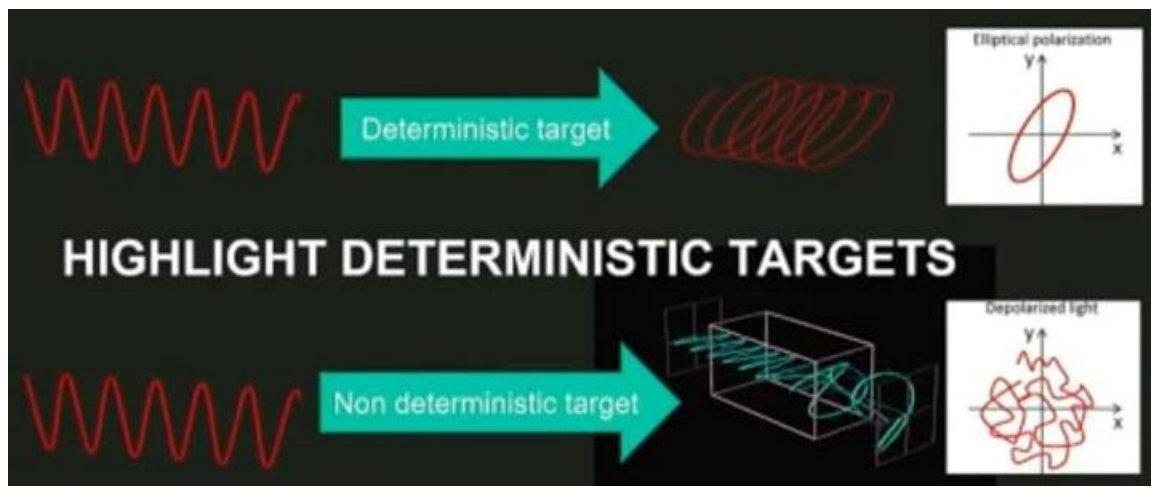
$$S_0 = |E_H|^2 + |E_V|^2 = C_{11} + C_{22} \quad (3)$$

$$S_1 = |E_H|^2 - |E_V|^2 = C_{11} - C_{22} \quad (4)$$

$$S_2 = 2 |E_H| |E_V| \cos \emptyset_{HV} = 2Re(C_{12})$$

$$S_3 = 2 |E_H| |E_V| \sin \emptyset_{HV} = 2Im(C_{12})$$

$$\vec{S} = \begin{bmatrix} S_0 \\ S_1 \\ S_2 \\ S_3 \end{bmatrix}$$



$$DoLP = \frac{\sqrt{S_1^2 + S_2^2}}{\sqrt{S_1^2 + S_2^2 + S_3^2}}$$

$$l_1 = \frac{1}{2} (S_0 + mS_0)$$

$$l_2 = \frac{1}{2} (S_0 - mS_0)$$

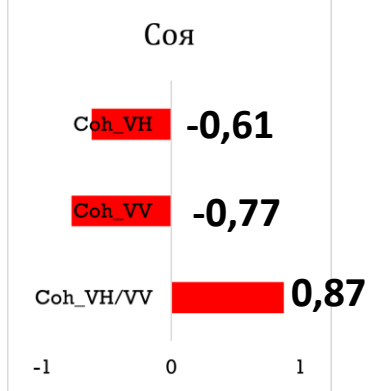
$$\psi = \frac{1}{2} \tan^{-1} \frac{S_2}{S_1}$$

$$\chi = \frac{1}{2} \tan^{-1} \frac{S_3}{\sqrt{S_1^2 + S_2^2}}$$

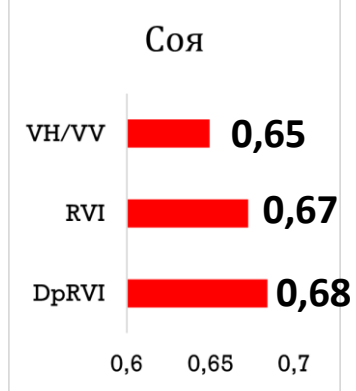
$$H(x) = - \sum_{i=1}^n p_i \log_2 p_i$$

Основные результаты

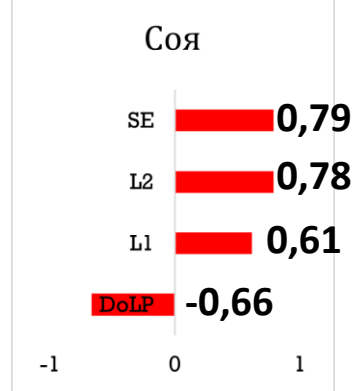
NDVI vs Coh



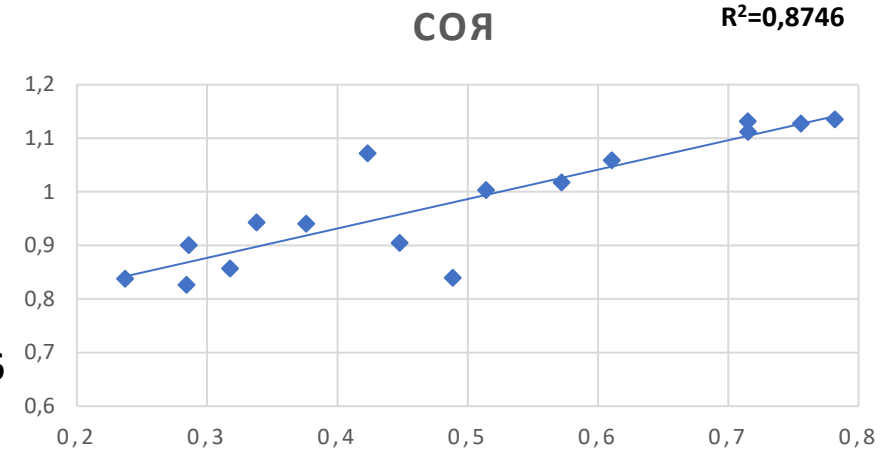
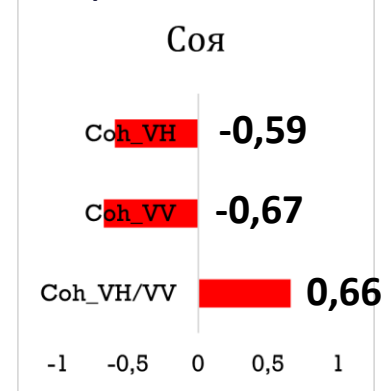
NDVI vs VI



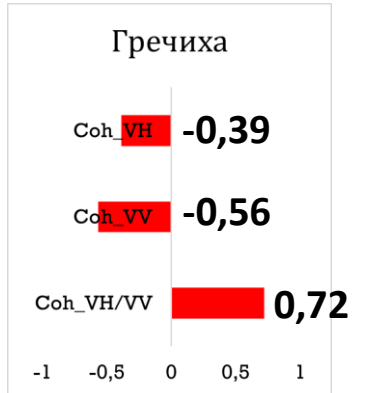
NDVI vs Pol



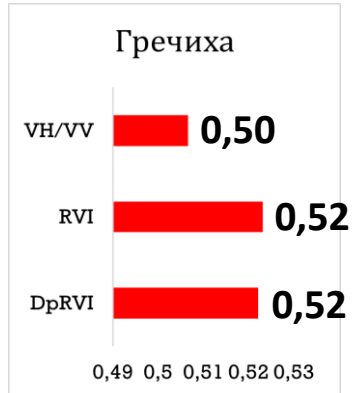
DpRVI vs Coh



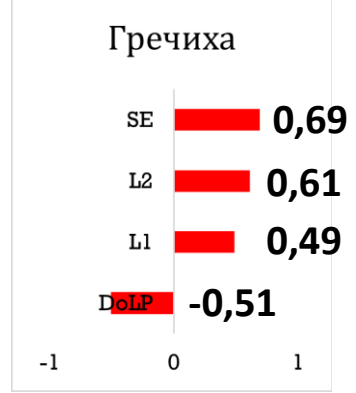
Гречиха



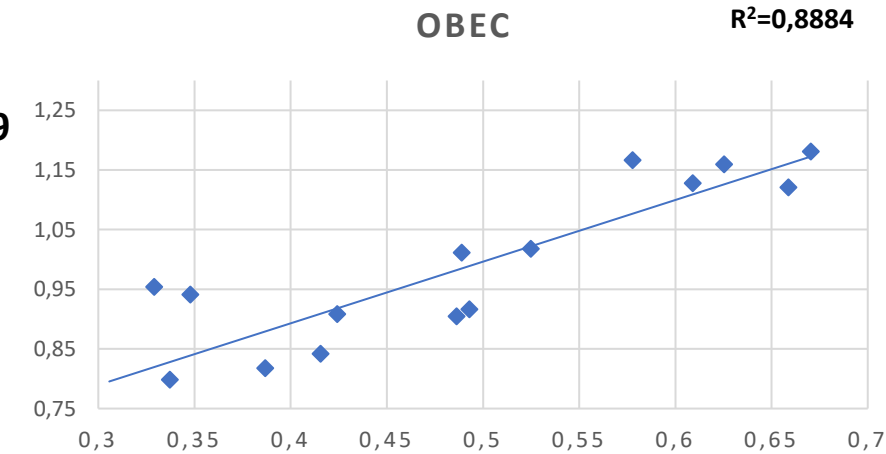
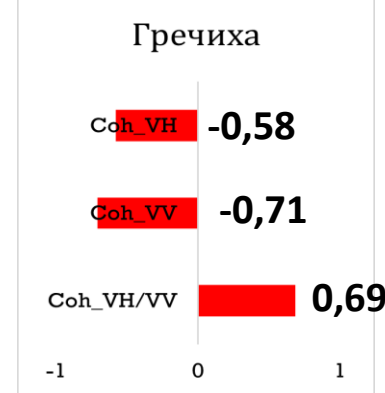
Гречиха



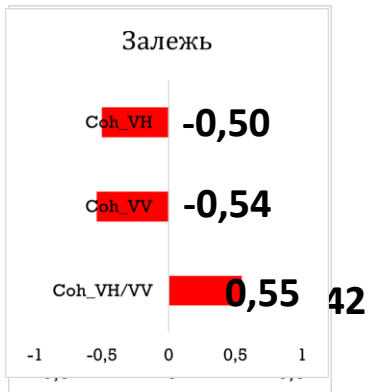
Гречиха



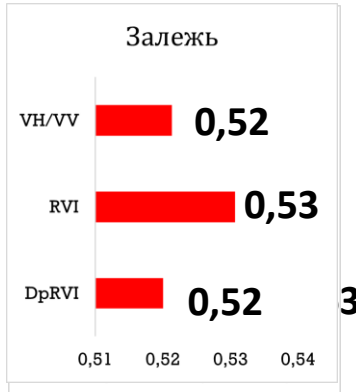
Гречиха



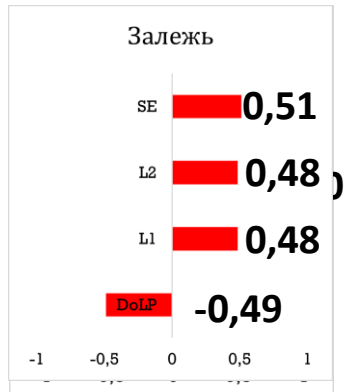
Залежь



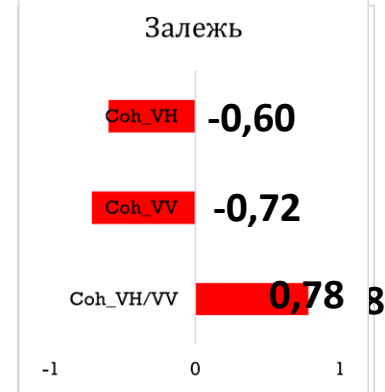
Залежь



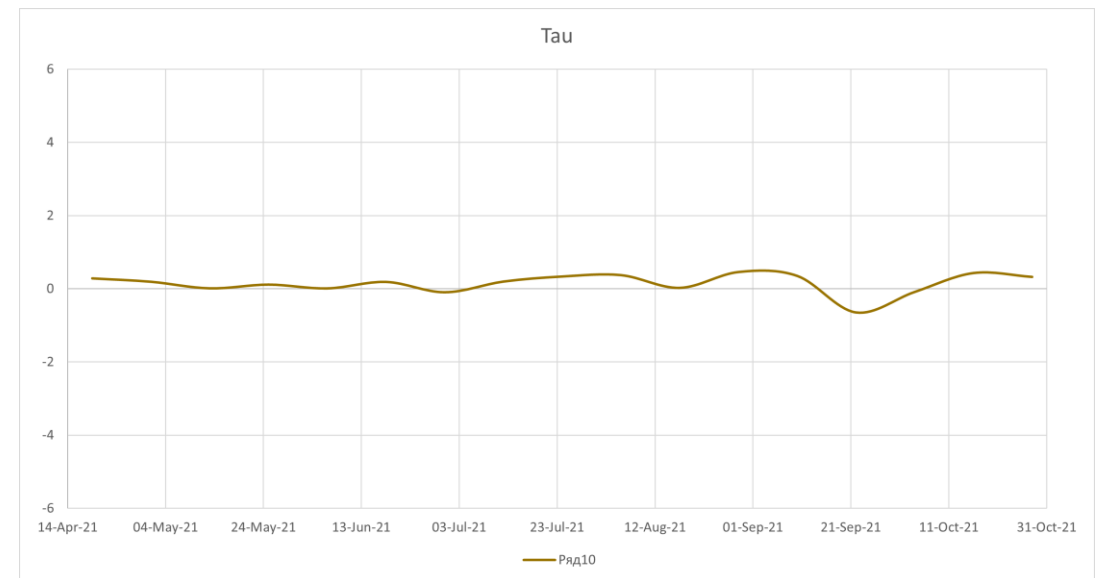
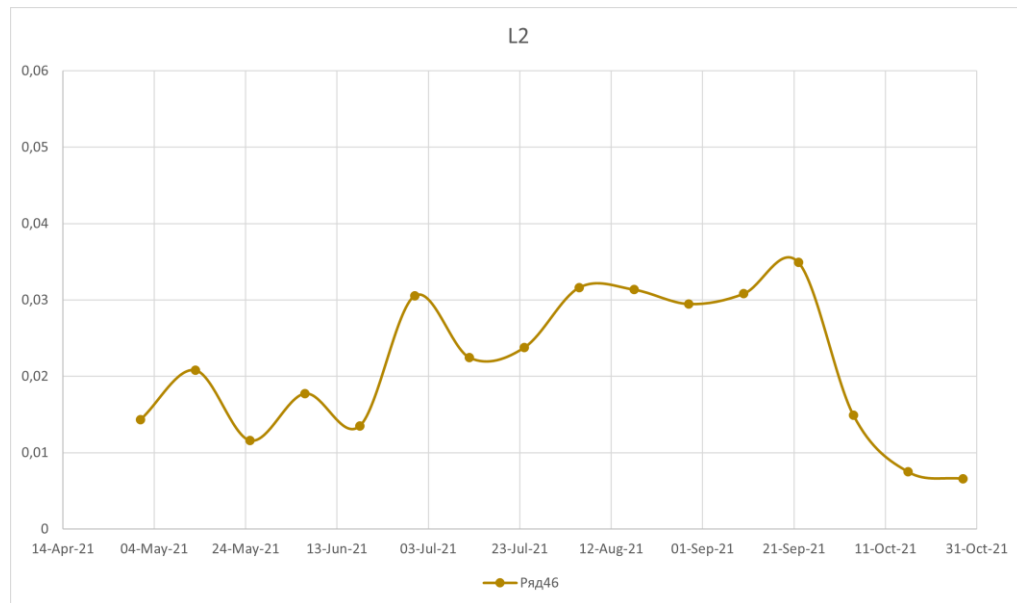
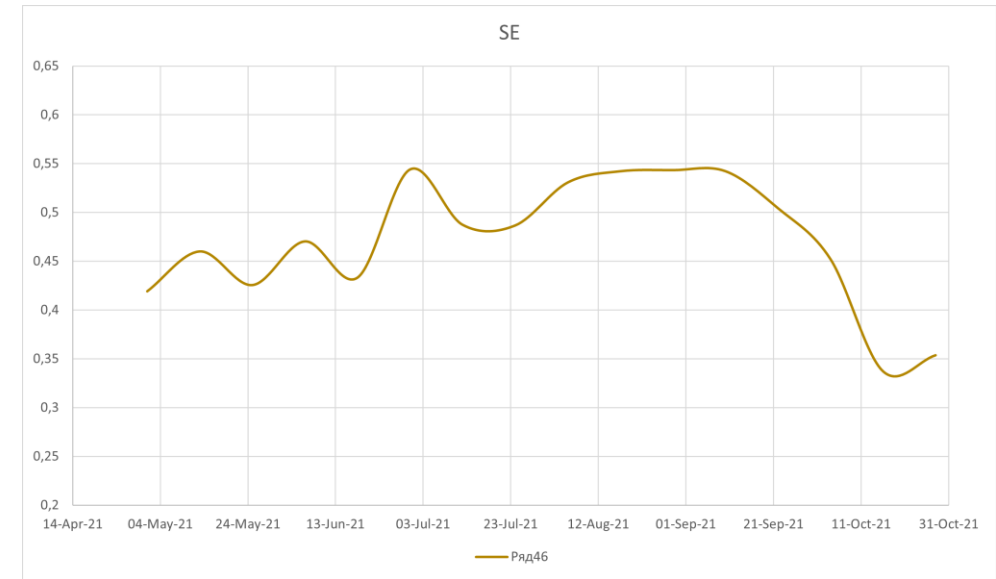
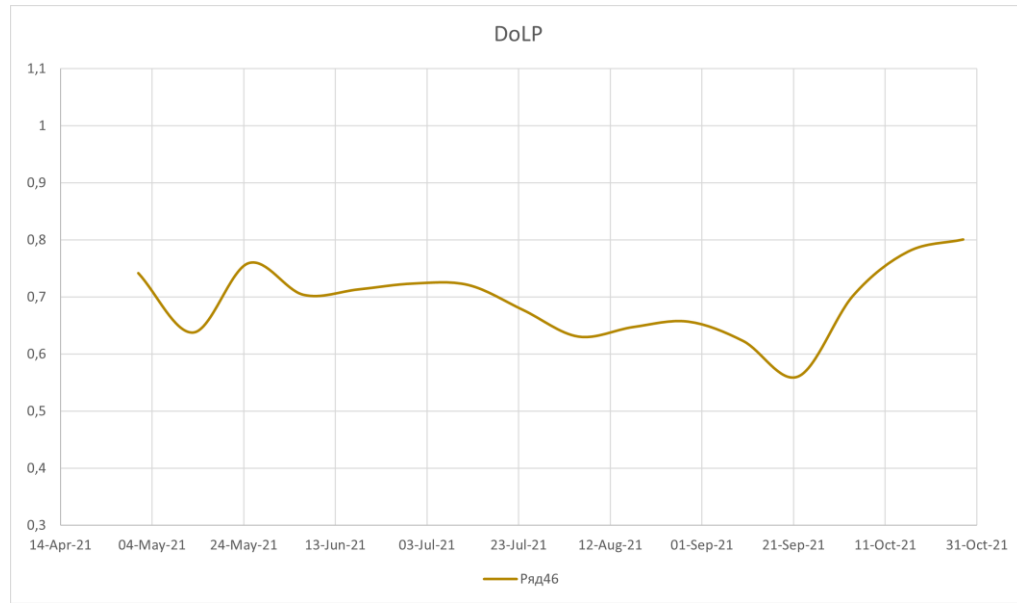
Залежь



Залежь

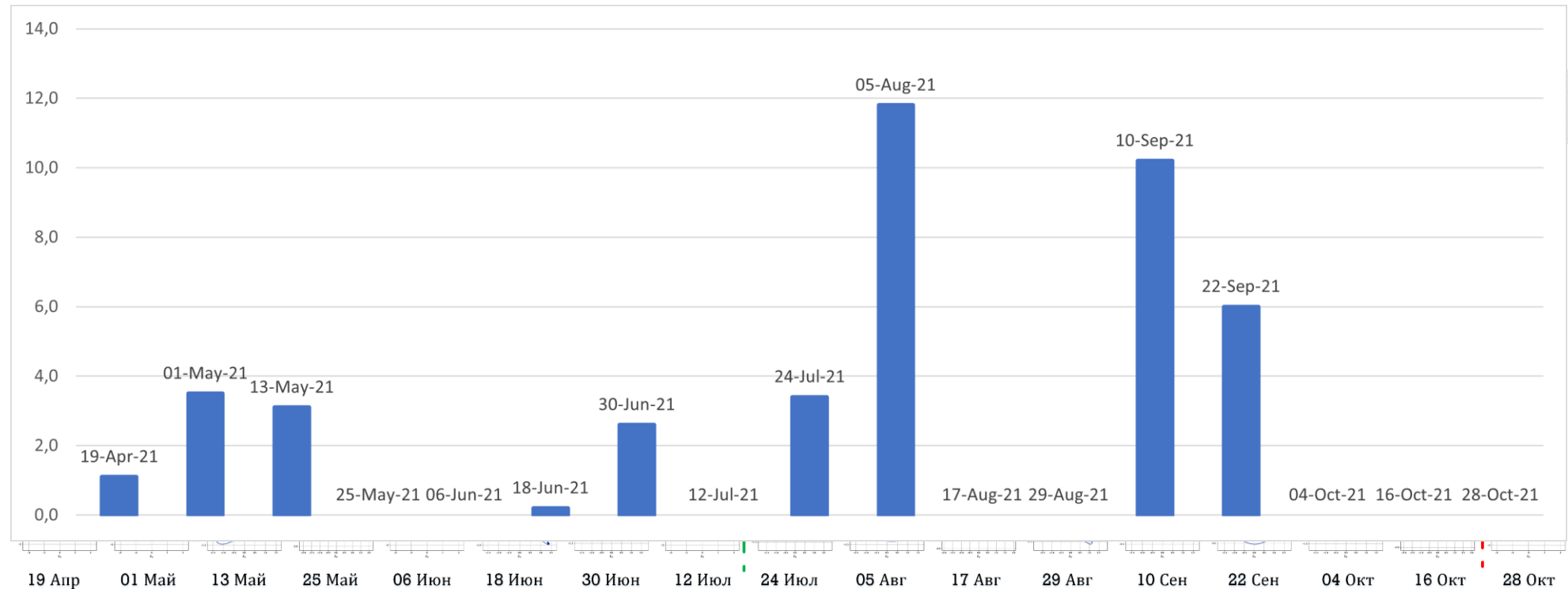
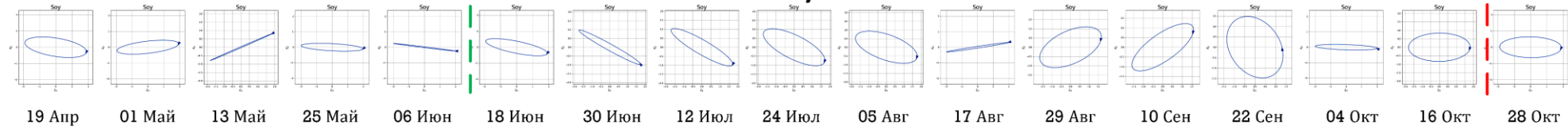


Основные результаты

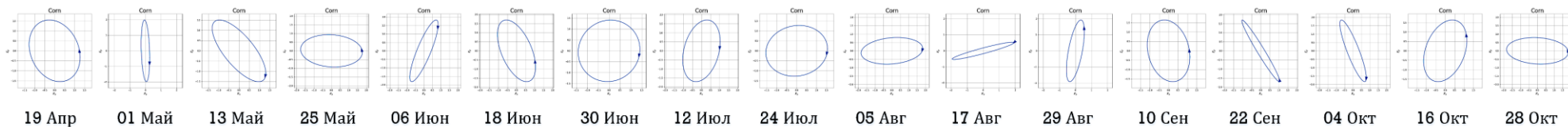


Основные результаты

Soy



Corn



Основные выводы

- ❑ Построены временные ряды радарных вегетационных индексов DpRVI, RVI, VH/VV и оптического NDVI для культур Хабаровского района. Установлено, что наиболее устойчивым оказался индекс DpRVI;
- ❑ Выявлены характеристики временных рядов DpRVI для культур (Max, день наступления Max, коэффициент вариации);
- ❑ Показано, что кривая сезонного хода одной культуры в разных регионах имеет схожий вид;
- ❑ Коэффициент вариации (для DpRVI) в период набора максимума вегетации для культур сои и овса имеет наименьшие показатели: (6.7%, 6.2%) – Хабаровский район; (4.4%, 11.7%) – Амурская область;
- ❑ Временные ряды интерферометрической когерентности отношения Coh_VH/Coh_VV имеют значительную корреляцию для полей сои порядка 0.87, для полей гречихи 0.72;

Перспективы

- Поляризация **HH, HV, VH, VV**;
- Повторяемость съемки 6-12 дней;
- Синхронность орбиты с Sentinel-1A/B/C;
- Данные Level-1 SLC.
- **Разрешение не важно!!!**
- Доступность.



Band	S –band, 12 cm
Resolution	10m – 12m
Polarization	HH, HV

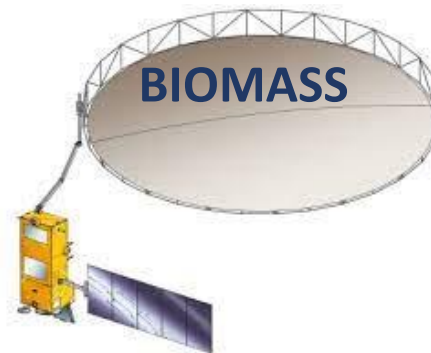


Band	C –band, 5,6 cm
Resolution	14m x 14m
Polarization	VH, VV

Rose-L



Band	L –band, 24 cm
Resolution	3m x 3m
Polarization	HH, HV, VH, VV



Band	P –band, 48 cm
Resolution	high
Polarization	HH, HV, VH, VV

Radarsat-2



Band	C-band, 5,6 cm
Resolution	5m x 5m
Polarization	HH, HV, VH, VV



Band	L –band, 24 cm
Resolution	10m x 10m
Polarization	HH, HV, VH, VV

Верхотуров Андрей Леонидович,
С.н.с., ВЦ ДВО РАН

Спасибо за внимание!

Контакты:

[e-mail: andrey@ccfebras.ru](mailto:andrey@ccfebras.ru)

телефон (раб.): 8(4212)70-39-13