

А.Л. ВЕРХОТУРОВ, А.С. СТЕПАНОВ, Л.В. ИЛЛАРИОНОВА  
**ИСПОЛЬЗОВАНИЕ РАДИОЛОКАЦИОННЫХ ДАННЫХ ДЛЯ  
МОНИТОРИНГА СОСТОЯНИЯ ПОСЕВОВ  
СЕЛЬСКОХОЗЯЙСТВЕННЫХ КУЛЬТУР НА ЮГЕ ДАЛЬНЕГО  
ВОСТОКА РОССИИ**

*Верхотуров А.Л., Степанов А.С., Илларионова Л.В.* **Использование радиолокационных данных для мониторинга состояния посевов сельскохозяйственных культур на юге Дальнего Востока России.**

**Аннотация.** Использование радиолокационных спутниковых данных в мониторинге сельскохозяйственных культур является перспективным дополнением методов и технологий, базирующихся на анализе мультиспектральных изображений. К основным достоинствам радиолокационных вегетационных индексов относится их чувствительность к поляриметрическим свойствам принимаемого сигнала, а также независимость от облачности. Это особенно важно для территории юга российского Дальнего Востока, муссонный климат которого обеспечивает влажную и облачную погоду в период набора сельскохозяйственными культурами максимальной биомассы. Для оценки возможностей радиолокационных спутниковых данных на примере пахотных земель Хабаровской края и Амурской области были проанализированы 64 снимка космического аппарата Sentinel-1 за период наблюдений с мая по октябрь 2021 года. Для каждого снимка были рассчитаны значения индексов DpRVI, RVI, VH/VV и построены временные ряды для всего периода наблюдений по отдельным полям (всего 342 поля). По мультиспектральным снимкам Sentinel-2 с использованием маски облачности были построены временные ряды NDVI. Были рассчитаны характеристики экстремумов временных рядов для разных типов пахотных земель: сои, овса, и залежи. Показано, что для каждой сельхозкультуры кривые сезонного хода DpRVI, RVI, VH/VV имели характерный вид. Установлено, что индекс DpRVI продемонстрировал наиболее высокую устойчивость – коэффициенты вариации сезонного хода DpRVI были существенно ниже показателей для RVI и VH/VV. Также было выявлено, что сходство между сезонным ходом индексов сохранялось для удаленных друг от друга регионов – Хабаровского края и Амурской области. Были рассчитаны основные характеристики сезонного хода временных рядов радиолокационных индексов в сравнении с NDVI – величина максимума, дата наступления максимума и вариабельность этих показателей. Установлено, во-первых, что значения этих показателей в разных регионах схожи между собой; во-вторых, вариабельность максимума и дня наступления максимума для DpRVI ниже, чем для RVI и VH/VV; в-третьих, вариабельность максимума и дня наступления максимума для DpRVI сопоставима с NDVI. Таким образом, можно сделать 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, моделирования урожайности и контроля севооборота.

**Ключевые слова:** данные дистанционного зондирования Земли, Дальний Восток, мониторинг сельскохозяйственных земель, радиолокационные вегетационные индексы, вариабельность, пахотные земли, сельскохозяйственная культура, временной ряд.

**1. Введение.** На сегодняшний день уровень развития спутниковых систем дистанционного зондирования Земли (ДЗЗ)

позволяет проводить эффективный мониторинг и анализ состояния сельскохозяйственных (с/х) культур, как на региональном уровне, так и на уровне всей страны. С увеличением пространственного разрешения и частоты съемки, использование накопленных многолетних архивов спутниковых данных в оптическом диапазоне длин волн и методы их обработки для такого рода задач получили широкое распространение в научном сообществе [1]. Оценка состояния возделываемых культур имеет важное значение: для понимания тенденций развития с/х производства, для обеспечения продовольственной безопасности, а также для борьбы с краткосрочными и долгосрочными угрозами. В связи с этим, остро стоит вопрос разработки специализированных информационных систем и сервисов, которые могут решать как комплексные, так и отдельные научные и научно-технические задачи в этом направлении. Такая работа активно ведется во всем мире. В качестве примеров можно привести систему Министерства сельского хозяйства и продовольствия Канады [2], которая в течение вегетационного сезона выпускает аналитические отчеты и материалы по инвентаризации урожая, основанные на анализе спутниковых данных отдельных территорий и провинций страны. В России можно отметить информационный сервис ВЕГА-PRO [3 – 5], разработанный учеными Института космических исследований РАН. Возможности этой системы позволяют проводить комплексный анализ состояния растительного покрова, лесов и посевов с/х культур, с использованием временных рядов различных вегетационных индексов.

Необходимо отметить, что наряду с данными ДЗЗ оптического диапазона в настоящее время наблюдается возрастающий интерес к развитию методов обработки с радара 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, которые ограничены возможностью использования данных оптических спутниковых изображений. С учетом вышесказанного данные РСА могут внести существенный вклад в развитие систем и технологий идентификации и мониторинга состояния посевов.

Известно, что диэлектрические и геометрические свойства растительности с/х угодий влияют на отражательную способность радиолокационного сигнала, который характеризуется коэффициентом обратного рассеяния или удельной эффективной площадью рассеяния (УЭПР). Как показано в [6] по мере набора биомассы пшеницы и подсолнечника, изменялись значения УЭПР. В работе [7] авторы исследовали чувствительность УЭПР двух поляризаций VH/VV (VH – вертикальная поляризация на передачу, горизонтальная на прием; VV – вертикальная поляризация на передачу и на прием) к динамике роста культур. Было отмечено, что отношение VH/VV лучше коррелировало с ростом биомассы, в отличие от отдельных коэффициентов VV и VH. В [8, 9] указывается, что VH/VV применимо и к оценке фенологического состояния культур, характеристике растительности и их классификации. Кроме того, это позволяет разделять культуры по признакам на кукурузу, сою и подсолнух на поздних стадиях их фазы развития.

Особое внимание также стоит обратить на работы, которые используют поляриметрические характеристики для мониторинга и классификации культур. В [9], авторы использовали энтропию Шеннона и общую мощность отраженного радиолокационного сигнала, принятого антенной радиолокатором в двух поляризаций для идентификации фенологических стадий роста пшеницы и канолы. В исследовании [10] сообщается, что при анализе временных рядов по данным РСА изображений таких характеристик как энтропия Шеннона, мера доминирующего механизма рассеяния и анизотропия, были получены более высокие оценки точности классификации культур. В [11] исследуются чувствительность тех же характеристик, но к фенологическим стадиям их роста. В то же самое время можно выделить работу [12], в которой одновременно рассматриваются показатели УЭПР и характеристики поляриметрического разложения радарного сигнала для анализа роста с/х культур.

Стоит отдельно упомянуть о появлении концепции вегетационных индексов по данным РСА изображений. В 2009 г. на основе радиолокационной съемки в четырехполяризационном режиме был разработан индекс RVI (Radar Vegetation Index) [13]. В работах [14 – 16] исследователи указывают на возможность использования RVI для двух поляризаций. Другая исследовательская группа разработала алгоритмы для вычисления индексов Generalized Radar Vegetation Index (GRVI) [17] и Compact-Pol Radar Vegetation Index (CpRVI) [18]. Вместе с тем они вычисляются на основе полно-

поляриметрических PCA изображений, таких спутников, например, как Radarsat-2 и Alos-2.

Общедоступность данных миссии Sentinel-1A/B, параметры её систематической съемки одного и того же участка местности (6 или 12 суток), пространственное разрешение 14м x 14м – побудило исследователей к разработке алгоритмов вычисления индексов с двойной поляризацией. Поэтому, значительный интерес представляют собой результаты следующих работ: Polarimetric Radar Vegetation Index [19] (PRVI), Dual Polarization SAR Vegetation Index (DPSVI) [20] и Dual polarimetric radar vegetation index [21] (DpRVI). В отличие от индексов VH/VV и RVI (с двойной поляризацией), в расчете DpRVI используются данные более низкого уровня обработки, Single Look Complex (SLC). В комплексном формате PCA изображений содержится информация о рассеянии радиолокационного сигнала, которая характеризуется степенью поляризации и мерой доминирующего механизма рассеяния. В свою очередь благодаря этим показателям, как отмечено в [21], индекс DpRVI становится более чувствительным к росту с/х культур и используется как относительно простой и физически интерпретируемый дескриптор растительности.

В последнее время все более актуальными становятся исследования, направленные на использование радиолокационных индексов, как известных ранее, так и вновь предложенных авторами. Такие работы прежде всего обусловлены развитием существующих современных радиолокационных спутниковых группировок (SAOCOM, TerraSAR-X/TanDEM-X, COSMO-SkyMed, Radarsat-2, Alos-2, Кондор-ФКА1 и другие), а также перспективой вывода на орбиту новых российских и зарубежных космических аппаратов с PCA (Кондор-ФКА2, NISAR, Sentinel-1C и другие). Так, например, исследователями был установлен достаточно высокий потенциал использования данных PCA Alos-2 в сравнении с Sentinel-1 на распаханых и покрытых растительностью с/х полях. Авторами была проведена оценка показателей поверхностной влажности почв [22]. Результаты показали, что обратное рассеяние от поверхности почвы, покрытой и не покрытой растительностью, в соответствии с моделью водяного облака WCM (Water Cloud Model, [23]) по данным Alos-2 в L-диапазоне были получены несколько лучшие результаты, чем для Sentinel-1 в C-диапазоне длин волн. Кроме того, вода является уникальным объектом при зондировании её микроволновыми частотами, на которых работают PCA и скаттерометры. Это единственная естественная среда с высокой

диэлектрической проницаемостью, поэтому увеличение доли жидкой воды, содержащейся в почве, снеге и растительности, увеличивает диэлектрические свойства этих сред, тем самым значительно изменяя их характеристики рассеяния и поглощения. УЭПР, измеряемая РСА системами, зависит от диэлектрических свойств поверхностного слоя почвы, шероховатости поверхности и растительности. Поэтому, данные РСА представляют собой особый интерес в исследованиях с/х угодий.

Таким образом, наряду с развитием спутниковых космических аппаратов РСА, недостаточная изученность особенностей сезонного хода радиолокационных вегетационных индексов, в том числе сравнительной устойчивости различных индексов для разных культур в пределах одного или соседних регионов является актуальной проблемой. Например, сравнительная оценка применимости DpRVI и RVI [21] строилась на анализе значений индексов для 4 снимков в период с 13 июня по 31 июля, что оставляло открытым вопрос о поведении временных рядов DpRVI на других этапах вегетационного периода. Также ранее не проводилось сравнение вариабельности временных рядов DpRVI в сравнении с индексом NDVI при оценке одних и тех же с/х полей и предполагалось, что радиолокационные индексы в сельском хозяйстве могут использоваться в основном как вспомогательные. В целом, работы по системному внедрению этих индексов в задачах сельского хозяйства будут иметь не только прикладное, но и фундаментальное значение, особенно для российской науки, в связи отсутствием комплексных исследований в отечественной практике о применении радиолокационных спутниковых данных для мониторинга с/х культур.

Поиск новых, ранее не исследованных, но устойчивых индексов, имеющих наименьшую пространственную вариабельность в течение всего вегетационного сезона, при этом сравнимую с NDVI – важен, в связи с развитием точного и цифрового земледелия. Сравнение пространственной вариабельности сезонного хода разных радарных индексов для отдельных регионов Дальнего Востока еще не проводилось и является новым результатом данного научного направления. Широко используемые индексы в оптическом диапазоне не всегда удовлетворяют потребностям исследователей. В дальнейшем использование устойчивого индекса может помочь в решении разных задач: уточнения контуров полей, контроль севооборота, картографирования, поиск неоднородностей на полях и других. Полученные результаты могут внести весомый вклад

в запланированные исследования временных рядов данных РСА в рамках международного эксперимента JECAM SAR [24].

Исходя из этого, необходимо провести анализ и оценку радарных вегетационных индексов, сравнить их устойчивость во временной серии РСА изображений, установить характерный вид хода роста каждой культуры, исследовать поведение культур для разных регионов. Исследованию этих вопросов посвящена представленная работа, основанная на использовании данных ДЗЗ микроволнового диапазона для анализа усредненных значений радарных вегетационных индексов на с/х полях.

В статье представлены результаты анализа и сравнительной характеристики временных рядов радиолокационных вегетационных индексов по данным съемки РСА. В качестве входных данных использовались РСА изображения спутников Sentinel-1A/B в период с апреля по октябрь 2021 года. Всего было отобрано и оконтурено 342 сельскохозяйственных поля (соя, овес и залежь) в векторном формате на территории Хабаровского района и Амурской области. Для каждого поля с культурой построены временные ряды средних значений вегетационных радиолокационных индексов (RVI, VH/VV и DpRVI). Проведена оценка вариабельности сезонного хода значений этих индексов и характеристик экстремумов в сравнении с индексом NDVI в двух регионах на территории юга Дальнего Востока России.

**2. Материалы и методы.** Территория исследования – Хабаровский край и Амурская область, входящие в состав Дальневосточного федерального округа. Были рассмотрены с/х поля в Хабаровском крае, расположенные в границах Хабаровского муниципального района, на правом берегу реки Амур и в бассейне реки Усури. Этот район характеризуется умеренным муссонным климатом с холодной снежной зимой (средняя температура в январе варьируется от  $-20^{\circ}\text{C}$ ) и тёплым летом, влажным во второй половине (средняя температура в июле превышает  $21^{\circ}\text{C}$ ). Среднегодовое распределение количества осадков находится на уровне 600–700 мм в год. Ближе к северо-западу региона он переходит в резко континентальный климат Восточной Сибири. Благоприятные климатические условия с дерново-подзолистыми почвами позволяют выращивать зерновые и зернобобовые культуры (рисунок 1).

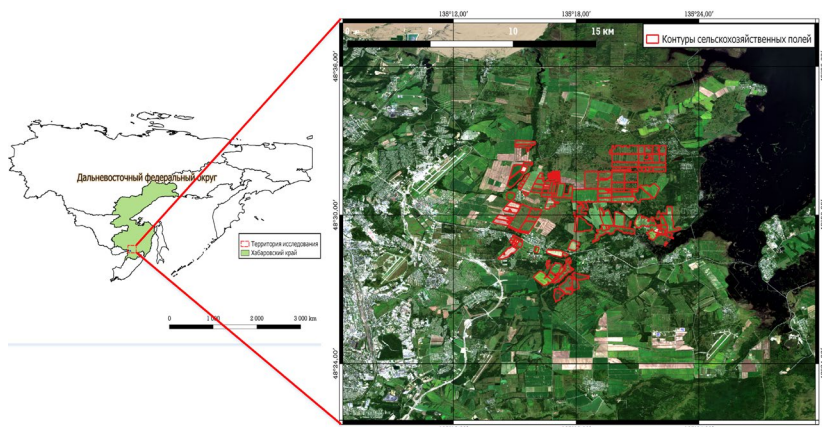


Рис. 1. Территория исследования. Хабаровский край, Хабаровский муниципальный район

Семь районов Амурской области (рисунок 2) (Белогорский, Бурейский, Ивановский, Константиновский, Михайловский, Октябрьский и Тамбовский) расположены на территории Зейско-Бурейнской равнины. Около 75% этой территории являются сельскохозяйственными угодьями. Общая площадь пахотных земель здесь составляет 1,32 млн га. Климат Амурской области в отличие от Хабаровского края более континентальный, так как область отгорожена от океана горами. Характеризуется жарким летом (средняя температура в июле превышает  $21^{\circ}\text{C}$ ), стабильно морозной зимой (средняя температура в январе варьируется от  $-25^{\circ}\text{C}$ ), с количеством осадков 850 мм в год. Причем наибольшее количество осадков выпадает в горной части на востоке области. Сравнительно высокие температуры и продолжительность вегетационного периода позволяют достигать высокие показатели урожая зерновых, технических и других культур.

Для расчета радиолокационных вегетационных индексов использовались спутниковые данные из распределенного архива ASF DAAC (Alaska Satellite Facility Distributed Active Archive Center). Были выбраны четыре сцены Sentinel-1 уровня обработки SLC, полученных с трех подспутниковых трека (таблица 1).

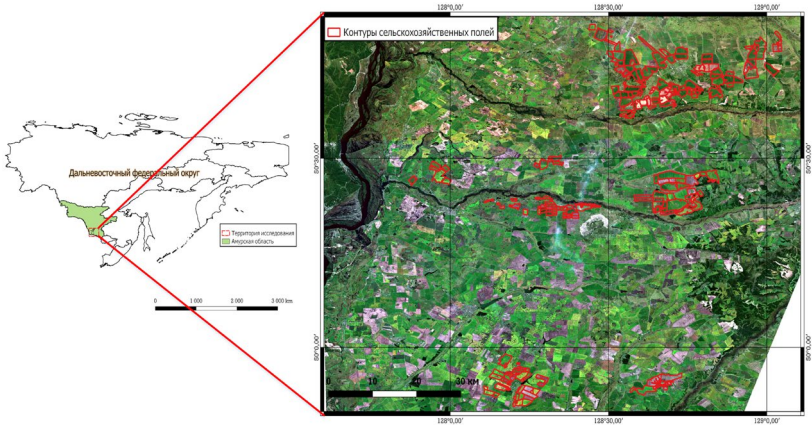


Рис. 2. Территория исследования. Амурская область

С помощью модуля Graph Processing Tool (GPF) программного обеспечения SNAP v.9.0 (<http://step.esa.int/main/>, по состоянию на 30 марта 2024 г.) был выполнен весь процесс обработки 16-ти PCA изображений на каждую сцену за 2021 год. В качестве выходной информации выступал сформированный 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 [25, 26]. Основные формулы для расчета индексов VH/VV, RVI и DpRVI:

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

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

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

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



где:

$\sigma_{VH}^0$  – УЭПР (дБ) для VH поляризации;

$\sigma_{VV}^0$  – УЭПР (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  $S_2$  на два неотрицательных собственных значения ( $\lambda_1 \geq \lambda_2 \geq 0$ );

$Tr$  – сумма диагональных элементов матрицы;

$| \cdot |$  – определитель матрицы.

Таблица 1. Параметры радиолокационной съемки исследуемой территории

Район исследования	Период наблюдения	Номер подспутникового трека	Пространственное разрешение	Углы съемки	Поляризация
Хабаровский край	С мая по октябрь 2021	90	14м x 14м	38.3°–43.1°	VV, VH
Амурская область	С мая по октябрь 2021	105, 134	14м x 14м	30.22°–32.47°	VV, VH

Для исследуемого района были рассмотрены всего 102 мультиспектральных снимка с разрешением 10м, полученных со спутников Sentinel-2A/B в период с 1 мая по 31 октября 2021 года. В дальнейшем формировались временные ряды NDVI, в которых значения показателей для каждого дня определялись по формулам:

$$NDVI = \frac{NIR - RED}{NIR + RED}, \quad (4)$$

где  $NIR$  – физический коэффициент отражения в ближней инфракрасной области спектра;

$RED$  – физический коэффициент отражения в красной области спектра.

Для оценки пространственной устойчивости радарных индексов для разных с/х полей использовался коэффициент вариации. Оценка степени сходства временных рядов базировалась на применении меры близости (евклидова расстояния). В качестве входной информации выступали данные временной серии индексов VH/VV, RVI, DpRVI и NDVI. Формулы для расчетов оцениваемых параметров следующие:

$$VAR_{VI_i} = \frac{\sigma(VI_i)}{\overline{VI}_i} \cdot 100\%, \quad (5)$$

$$d = \sqrt{\sum_{i=1}^n (\overline{VI}_i^{Khab} - \overline{VI}_i^{Amu})^2}, \quad (6)$$

$$i \in (1..n),$$

где:

$VAR$  – коэффициент вариации;

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

$\sigma(VI_i)$  – стандартное отклонение величины  $VI$  на определенную дату для полей одной с/х культуры;

$\overline{VI}_i$  – среднее значение вегетационного индекса на определенную дату для полей одной с/х культуры;

$n$  – количество спутниковых снимков;

$d$  – евклидово расстояние;

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

$\overline{VI}_i^{Amu}$  – среднее значение вегетационного индекса на определенную дату для всех полей с одной культурой в Амурской области.

Были рассчитаны средние значения максимума ( $\overline{VI_{max}}$ ) и дня наступления максимума ( $\overline{DOY_{max}}$ ), а также  $\Delta\overline{VI_{max}}$  и  $\Delta\overline{DOY_{max}}$

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

$$\Delta\overline{DOY_{max}} = t(p, f) \cdot \sigma(DOY_{max}), \quad (8)$$

где:

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

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

$t(p, f)$  – значения t-критерия,  $p=005$ .

По данным спутникового мониторинга для каждого из изучаемых отдельных полей Амурской области и Хабаровского края были построены средние временные ряды  $VI$  в период с 1 мая 2021

(121 календарный день) по 31 октября 2021 (304 календарный день) года. На рисунке 3 представлена временная шкала с датами, соответствующими мультиспектральным и радарным изображениям на примере Хабаровского края. Как видно, для этой области исследования было рассмотрено 47 снимков спутника Sentinel-2 (из них 24 были не пригодны из-за высокой облачности) и 16 радиолокационных изображений, полученных со спутника Sentinel-1. Для Амурской области, соответственно, было получено 55 снимков Sentinel-2 и 48 снимков Sentinel-1.

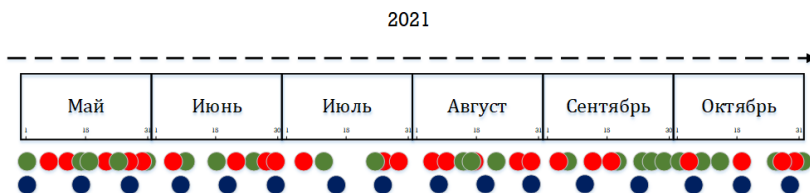


Рис. 3. Спутниковые данные Sentinel-1и Sentinel-2 (Хабаровский край).  
 Зеленым цветом – безоблачные снимки Sentinel-2 (менее 20% облачности),  
 красным цветом – снимки Sentinel-2 с высокой облачностью,  
 синим цветом – радиолокационные снимки Sentinel-1

Для расчета средних значений на дату для отдельных полей предварительно оценивалась однородность выборки. Несмотря на то, что  $DpRVI$ ,  $RVI$ ,  $VH/VV$  практически не зависят от атмосферных явлений, на некоторых участках полей могут наблюдаться аномальные значения этого показателя. Для индекса  $NDVI$  неоднородность выборки напрямую могла быть связана с облачностью. Чтобы свести к минимуму влияние таких шумов, была проведена фильтрация с использованием доверительного интервала: для каждого поля и для каждой даты были рассчитаны среднее значение радиолокационных  $VI$  и  $NDVI$  и стандартное отклонение ( $\sigma$ ). Границы доверительного интервала рассчитывали по следующей формуле

$$VI_d = \bar{VI} \pm t(P, f) * \sigma, \quad (9)$$

где:

$t(P, f)$  – t-критерий Стьюдента, ( $P=0,95$ );

$f$  – число степеней свободы;

$\sigma$  – стандартное отклонение величины  $VI$ .

Значения радиолокационных VI и NDVI для пикселей отдельных полей, не вошедших в доверительный интервал, не участвовали в расчете средних значений по отдельным полям.

По данным Росстата, основной сельскохозяйственной культурой южной части Дальнего Востока, на долю которой приходится более 70% общей площади пахотных земель регионе, являлась соя. На втором месте в последние годы в большинстве муниципальных образований Хабаровского края и Амурской области находился овес. При этом овес часто использовался в многолетнем севообороте с соей, что обуславливает важность сочетанного исследования сезонного хода индексов вегетации этих двух культур. И, наконец, Дальневосточный федеральный округ в 2021-2023 гг. занимал лидирующие места среди федеральных округов РФ по доли залежи: свыше 9% от площади сельскохозяйственных угодий. В настоящей работе авторами были рассмотрены три класса: соя и овес, а также залежные земли. Общая площадь исследуемых полей (342 поля) составила более 13000 га. Площадь рассмотренных отдельных полей в Хабаровском крае составила 3389 га (128 полей), среди них соя – 1147 га (33 поля), овес – 751 га (30 полей), залежь – 1491 га (65 полей). В Амурской области вегетационные индексы рассчитывались для 214 полей общей площадью 9812 га, в том числе 184 поля с соей (8207 га), 16 полей с овсом (623 га), 14 залежных полей (982 га).

**3. Результаты.** На рисунке 4 представлены значения радарных индексов вегетации для полей с соей, овсом, а также залежных земель в Хабаровском крае и Амурской области. Как видно, для каждого рассматриваемого класса, кривые DpRVI, RVI, VH/VV имели схожий вид. Коэффициенты корреляции, рассчитанные между показателями временных рядов для трех видов радарных индексов, находились в диапазоне 0,96-0,99 для разных классов полей. Значения временных рядов сезонного хода радарных VI сои возрастали в период с начала июля до последней декады сентября (рисунок 4(а, б, в)). Это является достаточно логичным, учитывая, что сев сои в южной части Дальнем Востоке обычно проводится в конце мая и в первой половине июня, при этом формирование травяного покрова в 2021 г. на полях в мае могло зависеть от сроков вспашки, обработки гербицидами и прочих мероприятий. Начиная с конца сентября, значения радарных VI для полей с соей достаточно быстро уменьшались, что было связано со стадией увядания растений при низких температурных характеристиках. В это время соя готова к уборке, но точная дата для разных регионов и муниципалитетов различалась в зависимости от погодных условий (вплоть до начала календарной зимы).

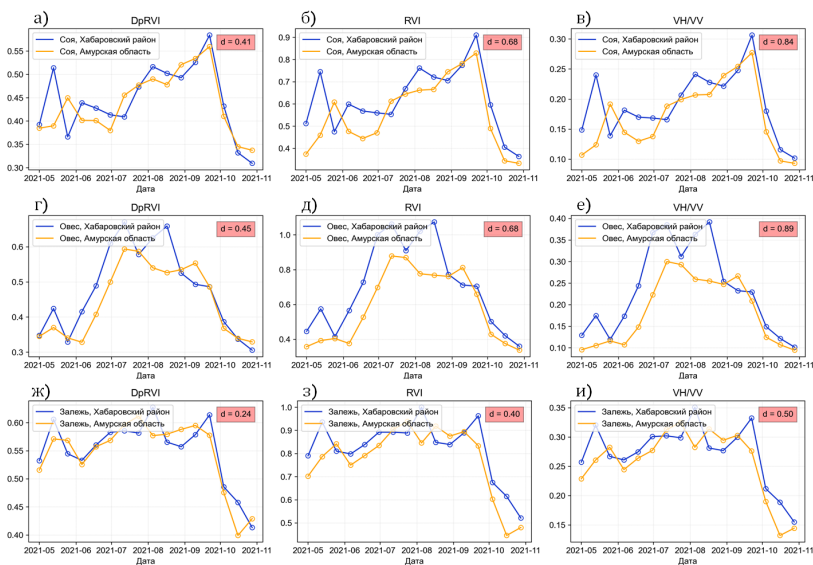


Рис. 4. Средние значения временных рядов евклидова расстояния DpRVI, RVI, VN/VV для сельскохозяйственных земель 2021 года в Хабаровском крае и Амурской области: а), б), в) – соя; г), д), е) – овес; ж), з), и) – залежь

Сев овса проводится в мае; однако можно отметить, что для Хабаровского края наблюдалось раннее повышение значений радарных VI перед посевом культуры (рисунок 4(г, д, е)). Достаточно высокие значения характерны в этот же период также и для полей с соей, что могло быть вызвано как быстрым ростом сорных культур, так и особенностями севооборота – семена овса, оставленные на поле в прошлый год, давали ранние всходы. Максимум радарных VI для овса достигался в июле. Для всей области исследования уборка овса проводилась с последней декады июля по последнюю декаду августа. При этом, на некоторых полях в сентябре мог продолжаться рост значений VI, что обусловлено развитием биомассы многолетних трав после уборки овса, что особенно актуально для Дальнего Востока, где посеы овса зачастую проводятся совместно с многолетними травами. Кривая сезонного хода радарных VI на залежных землях не продемонстрировала выраженных пиков, что связано с естественным ростом травы и отсутствием посевной и уборочной кампании (рисунок 4(ж, з, и)). Тем не менее, различные природные и антропогенные явления могут привести к определенным отклонениям роста травяного покрова на заброшенных пахотных землях.

Проведенный анализ попарного сходства значений временных рядов индексов вегетации для Хабаровского края и Амурской области продемонстрировал, что значения меры близости для индекса DpRVI были минимальны, а для VH/VV – максимальны. Так, для полей с соей  $d=0,41; 0,68; 0,84$ , соответственно для DpRVI, RVI, VH/VV. Для полей с овсом и залежных земель значения  $d$  составили  $0,45; 0,68; 0,89$  и  $0,24; 0,40; 0,50$ . Исследования вариабельности сезонного хода индексов VI для отдельных полей подтвердили наибольшую стабильность и устойчивость индекса DpRVI. Вариабельность трех индексов в период вегетационного цикла для всех исследуемых классов существенно различается (рисунок 5). 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% (рисунок 5(а)). С середины июля до третьей декады сентября вариабельность 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% (рисунок 5(б)). Более высокие значения коэффициентов вариации для сезонного хода VI для полей с соей в Амурской области могли быть объяснены сортовым разнообразием сои в регионе. На рисунках 5(в) и 5(г) представлены изменения вариабельности значений VI в период с 1 мая по 31 октября для полей с овсом. Как видно, значения коэффициентов вариации DpRVI для отдельных полей на всем периоде наблюдений ниже, чем для индексов RVI и VH/VV соответственно, в среднем на 5-8% и 10-15%. Минимальные значения вариабельности радиолокационных индексов вегетации в Хабаровском крае в период с начала июля до середины августа (от вызревания до уборки) составили 3-10% для DpRVI, 10-13% для RVI, 14-20% для VH/VV (рисунок 5(в)). Дальнейший рост вариабельности связан с особенностями сева овса – для части полей сев проводился с подсевом многолетних трав, что способствовало росту значений индекса, для части полей подсев не использовался. В Амурской области сроки уборки овса в 2021 году в ряде муниципалитетов были смещены в сравнении с другими территориями, что вызвало увеличение значений коэффициентов вариации в августе. Для залежных полей практически для всех точек временных рядов VI и в Хабаровском крае, и в Амурской области наблюдалась закономерность, свойственная индексам для полей с соей и овсом – вариабельность DpRVI ниже, чем вариабельность значений RVI и VH/VV (рисунок 5(д, е)). При этом значения коэффициентов

вариации сезонного хода DpRVI залежи в Хабаровском районе во всем периоде наблюдений, за исключением последней недели октября, не превышали 10% (рисунок 5(д)). Для Амурской области значения коэффициентов вариации сезонного хода DpRVI залежных земель резко возрастают с началом октября, что возможно связано с большой пространственной удаленностью отдельных полей в Амурской области, различными метеорологическими условиями, и соответственно с разной продолжительностью вегетационных циклов (рисунок 5(е)). Пространственная неоднородность в Амурской области естественно, оказывает влияние и на вариабельность значений VI сои, овса и прочих культур.

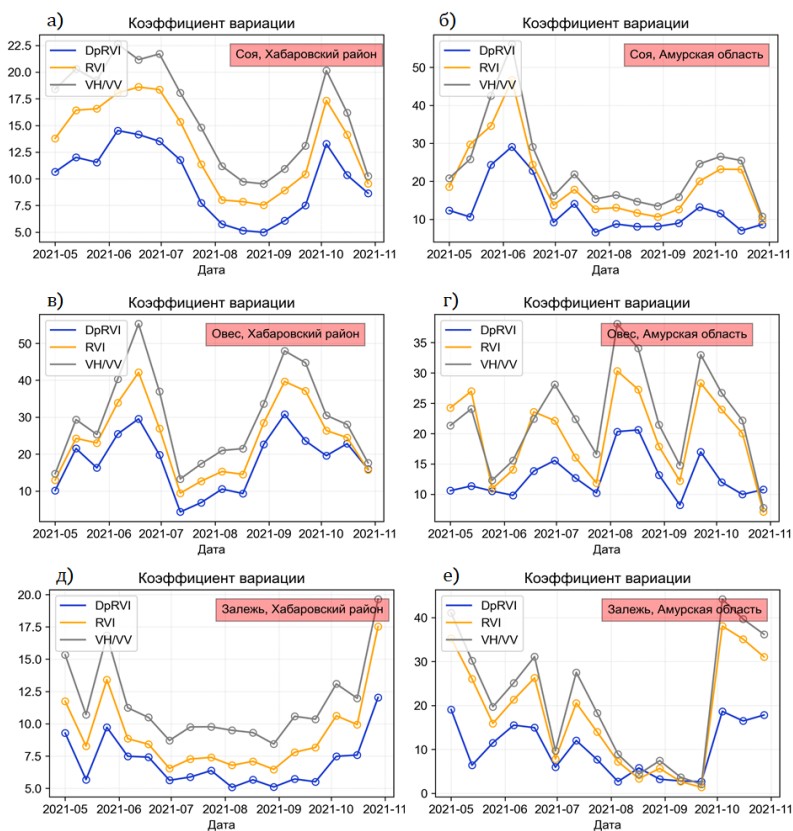


Рис. 5. Средние значения временных рядов коэффициента вариации DpRVI, RVI, VH/VV для сельскохозяйственных земель 2021 года в Хабаровском крае и Амурской области: а), б) – соя; в), г) – овес; д), е) – залежь

Основные характеристики временных рядов VI для отдельных полей с посевами сои, овса и залежных земель представлены в таблицах 1-3. Были рассчитаны численные значения среднего максимума VI, среднего значения дня наступления максимума, а также вариабельность этих показателей отдельно для Хабаровского края и Амурской области. Для сравнения, помимо радиолокационных индексов, определялись средние значения максимума и дня наступления максимума для сезонного хода NDVI.

Таблица 2. Характеристики временных рядов VI для отдельных полей с посевами сои в 2021 г. в Хабаровском крае и Амурской области

Регион	Характеристики	VI			
		<i>DpRVI</i>	<i>RVI</i>	<i>VH/VV</i>	<i>NDVI</i>
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
	$VAR_{VI_{max}}$	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
	$VAR_{DOY_{max}}$	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
	$VAR_{VI_{max}}$	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
	$VAR_{DOY_{max}}$	2,9	4,1	5,1	5,5

Как видно из таблицы 2, средние значения  $\overline{VI}_{max}$  и  $\overline{DOY}_{max}$  сои 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%. Вариабельность максимума *NDVI*, а также дня наступления максимума *NDVI* была несколько ниже соответствующих показателей для *DpRVI*.



Таблица 3. Характеристики временных рядов VI для отдельных полей с посевами овса в 2021 г. в Хабаровском крае и Амурской области

Регион	Характеристики	VI			
		$DpRVI$	$RVI$	$VH/VV$	$NDVI$
Хабаровский край	$\overline{VI_{max}} \pm \Delta\overline{VI_{max}}$	0,69±0,11	0,96±0,34	0,44±0,20	0,69±0,24
	$VAR_{VI_{max}}$	6,2	11,3	17,8	8,1
	$\overline{DOY_{max}} \pm \Delta\overline{DOY_{max}}$	193,3±33,8	203,0±35,4	200,7±42,4	200,3±34,8
	$VAR_{DOY_{max}}$	6,8	7,8	8,7	5,9
Амурская область	$\overline{VI_{max}} \pm \Delta\overline{VI_{max}}$	0,61±0,16	0,91±0,32	0,31±0,16	0,76±0,19
	$VAR_{VI_{max}}$	11,7	15,6	21,9	13,6
	$\overline{DOY_{max}} \pm \Delta\overline{DOY_{max}}$	199,0±19,2	201,4±22,3	204,1±25,6	195,6±21,3
	$VAR_{DOY_{max}}$	4,3	4,9	5,3	4,9

Для отдельных полей с овсом вариабельность максимума и дня наступления максимума радиолокационных VI выше, чем для полей с соей. В Хабаровском крае для максимума  $VAR_{DpRVI_{max}}$  был равен 6,2%, в Амурской области – 11,7%. Значения показателей для RVI и VH/VV были выше примерно в 1,5-3 раза. Вариабельность максимума NDVI для полей с овсом была на уровне вариабельности DpRVI – 8,1% и 13,6% в зависимости от региона. Значения календарного дня максимума для полей с овсом также отличались большей вариативностью в сравнении с соей, что объясняется особенностями сева овса с подсевом многолетних трав. При этом коэффициенты вариации дня максимума DpRVI для полей с овсом в Хабаровском крае были выше, чем соответствующий показатель для NDVI – 6,8% и 5,9%. В Амурской области, напротив,  $VAR_{DOY_{max}}$  для DpRVI был равен 4,3%, а для NDVI – 4,9%.

Средние значения  $\overline{VI_{max}}$  для радиолокационных индексов и NDVI залежи в Хабаровском крае и Амурской области также соответствуют друг другу (таблица 4). Вариабельность DpRVI для отдельных полей с залежью ниже, чем вариабельность RVI и VH/VV, что соответствует коэффициентам вариации максимума NDVI. Необходимо отметить, что дни наступления максимума для залежи на разных полях обладали большой вариативностью, что вполне

объяснимо, учитывая природу залежи. Низкие значения  $VAR_{DOY_{max}}$  не могут служить показателем устойчивости того или иного индекса.

Таблица 4. Характеристики временных рядов VI для залежных земель в 2021 г. в Хабаровском крае и Амурской области

Регион	Характеристики	VI			
		$DpRVI$	$RVI$	$VH/VV$	$NDVI$
Хабаровский край	$\overline{VI_{max}} \pm \Delta \overline{VI_{max}}$	0,65±0,05	0,97±0,12	0,36±0,05	0,75±0,07
	$VAR_{VI_{max}}$	4,0	5,7	7,5	4,6
	$\overline{DOY_{max}} \pm \Delta \overline{DOY_{max}}$	207,4±97,1	208,1±92,1	208,6±92,8	200,1±64,8
	$VAR_{DOY_{max}}$	23,4	22,2	22,3	13,7
Амурская область	$\overline{VI_{max}} \pm \Delta \overline{VI_{max}}$	0,65±0,10	0,98±0,23	0,36±0,12	0,72±0,09
	$VAR_{VI_{max}}$	6,3	9,3	13,3	5,6
	$\overline{DOY_{max}} \pm \Delta \overline{DOY_{max}}$	196,4±121,9	191,3±111,7	192,4±122,6	195,6±61,3
	$VAR_{DOY_{max}}$	25,4	23,9	25,7	14,1

**4. Выводы.** Проведенное исследование, выполненное в рамках разработки системного подхода к использованию радиолокационных изображений в цифровом земледелии, продемонстрировало, что временные ряды радиолокационных индексов  $DpRVI$ ,  $RVI$ ,  $VH/VV$  для основных типов с/х 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. Были рассчитаны основные характеристики сезонного хода временных рядов радиолокационных VI в сравнении с NDVI – величина максимума VI, дата наступления максимума и значения коэффициента вариации для этих показателей. Было установлено, во-первых, что значения этих показателей в разных регионах схожи между собой; во-вторых, вариабельность максимума и дня наступления максимума для DpRVI ниже, чем для RVI и VH/VV; в-третьих, вариабельность максимума и дня наступления максимума для DpRVI сопоставима с NDVI. 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.

Стоит отметить, что индекс DpRVI с двойной поляризацией представляет значительный интерес, так как в запланированных будущих миссиях, таких как Sentinel-1C/D, NISAR и Sentinel-1 Next Generation, не для всех режимов съемки будут использоваться все четыре поляризации, в то время как двойная поляризация – присутствует во многих режимах. Кроме того, необходима дальнейшая оценка и анализ данных поляриметрического режима съемки для HV/HH поляризаций. Коэффициент обратного рассеяния от полога  $c/x$  культур может отличаться от VH/VV поляризаций, т.к. передаваемые горизонтально поляризованные электромагнитные волны по-другому будут взаимодействовать в отличие от вертикальной поляризации. Также необходимы исследования зависимости вегетационных индексов от угла падения радиолокационного сигнала радарного изображения. Весьма интересен S-диапазон длин волн для задач сельского хозяйства, поэтому вывод на орбиту российского спутника Кондор-ФКА1 представляет собой многообещающую перспективу.

В связи с прекращением функционирования одного из спутников миссии Sentinel-1, ближайшими работами коллектива авторов предполагаются исследования, направленные на: обработку радарных снимков, расчет и анализ временных рядов DpRVI для некоторых российских и зарубежных спутников, интегрирование и совместное использование оптических и радарных изображений, использование нейросетевых подходов к моделированию урожайности и другие.

### Литература

1. Якушев В.П., Захарян Ю.Г., Блохина С.Ю. Состояние и перспективы использования дистанционного зондирования Земли в сельском хозяйстве //

- Современные проблемы дистанционного зондирования земли из космоса. 2022. Т. 19. № 1. С. 287–294.
2. Fisette T., Rollin P., Aly Z., Campbell, L., Daneshfar, B., Filyer, P., Smith A., Davidson A., Shang J., Jarvis I. AAFC annual crop inventory // Second International Conference on Agro-Geoinformatics (Agro-Geoinformatics). 2013. pp. 270–274.
  3. Лупян Е.А., Барталев С.А., Толпин В.А., Жарко В.О., Крашенинникова Ю.С., Оксюкевич А.Ю. Использование спутникового сервиса ВЕГА в региональных системах дистанционного мониторинга // Современные проблемы дистанционного зондирования земли из космоса. 2014. Т. 11. № 3. С. 215–232.
  4. Лупян Е.А., Прошин А.А., Бурцев М.А., Кашницкий А.В., Балашов И.В., Барталев С.А., Бриль А.А., Егоров В.А., Жарко В.О., Константинова А.М., Кобец Д.А., Мазуров А.А., Марченков В.В., Матвеев А.М., Миклашевич Т.С., Плотников Д.Е., Радченко М.В., Стыщенко Ф.В., Сычугов И.Г., Толпин В.А., Уваров И.А., Хвостиков С.А., Ховратович Т.С. Система «Вега-Science»: особенности построения, основные возможности и опыт использования // Современные проблемы дистанционного зондирования земли из космоса. 2021. Т. 18. № 6. С. 9–31.
  5. Денисов П.В., Трошко К.А., Лупян Е.А., Толпин В.А. Возможности и опыт использования информационной системы ВЕГА-PRO для мониторинга сельскохозяйственных земель // Вычислительные технологии. 2022. Т. 27. № 3. С. 66–83.
  6. Macelloni G., Paloscia S., Pampaloni P., Ruisi R., Dechambre M., Valentin R., Chanzy A., Prevot L., Bruguier N. Modelling radar backscatter from crops during the growth cycle // *Agronomie*. 2002. vol. 22. № 6. pp. 575–579.
  7. Blaes X., Defourny P., Wegmuller U., Della Vecchia A., Guerrierio L., Ferrazzoli P. C-band polarimetric indexes for maize monitoring based on a validated radiative transfer model // *IEEE Transactions on Geoscience and Remote Sensing*. 2006. vol. 44. no. 4. pp. 791–800.
  8. McNairn H., Champagne C., Shang J., Holmstrom D., Reichert G. Integration of optical and Synthetic Aperture Radar (SAR) imagery for delivering operational annual crop inventories // *ISPRS Journal of Photogrammetry and Remote Sensing*. 2009. vol. 64. no. 5. pp. 434–449.
  9. Mercier A., Betbeder J., Baudry J., Le Roux V., Spicher F., Lacoux J., Roger D., Hubert-Moy L. Evaluation of Sentinel-1 & 2 time series for predicting wheat and rapeseed phenological stages // *ISPRS Journal of Photogrammetry and Remote Sensing*. 2020. vol. 163. pp. 231–256.
  10. Li M., Bijker W. Potential of Multi-Temporal Sentinel-1A Dual Polarization SAR Images for Vegetable Classification in Indonesia // *IEEE International Geoscience and Remote Sensing Symposium*. 2018. pp. 3820–3823.
  11. Harfenmeister K., Itzerott S., Weltzien C., Spengler D. Detecting Phenological Development of Winter Wheat and Winter Barley Using Time Series of Sentinel-1 and Sentinel-2 // *Remote Sensing*. 2021. vol. 13(24). no. 5036.
  12. Bao X., Zhang R., Lv J., Wu R., Zhang H., Chen J., Zhang B., Ouyang X., Liu G.. Vegetation descriptors from Sentinel-1 SAR data for crop growth monitoring // *ISPRS Journal of Photogrammetry and Remote Sensing*. 2023. vol. 203(17). pp. 86–114.
  13. 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. no. 8. pp. 2519–2527.
  14. 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.

15. Kumar S., Rao S., Sharma J. Radar Vegetation Index as an Alternative to NDVI for Monitoring of Soyabean and Cotton // Proceedings of the XXXIII INCA International Congress (Indian Cartographer). 2013. vol. 33. pp. 91–96.
16. Nasirzadehdizaji R., Balik Sanli F., Abdikan S., Cakir Z., Sekertekin A., Ustuner M.. Sensitivity Analysis of Multi-Temporal Sentinel-1 SAR Parameters to Crop Height and Canopy Coverage // Applied Sciences. 2019. vol. 9(4). no. 655.
17. Ratha D., Mandal D., Kumar V., McNairn H., Bhattacharya A., Frery A.C. A Generalized Volume Scattering Model-Based Vegetation Index From Polarimetric SAR Data // IEEE Geoscience and Remote Sensing Letters. 2019. vol. 16. no. 11. pp. 1791–1795.
18. Mandal D., Ratha D., Bhattacharya A., Kumar V., McNairn H., Rao Y.S., Frery A.C. A Radar Vegetation Index for Crop Monitoring Using Compact Polarimetric SAR Data // IEEE Transactions on Geoscience and Remote Sensing. 2020. vol. 58. no. 9. pp. 6321–6335.
19. 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. no 12. pp. 7102–7108.
20. 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.
21. Mandal D., Kumar V., Ratha D., Dey S., Bhattacharya A., Lopez-Sanchez J. M., McNairn H., Rao Y.S. Dual polarimetric radar vegetation index for crop growth monitoring using Sentinel-1 SAR data // Remote Sensing of Environment. 2020. vol. 247. no. 111954.
22. Sekertekin A., Marangoz A.M., Abdikan S. ALOS-2 and Sentinel-1 SAR data sensitivity analysis to surface soil moisture over bare and vegetated agricultural fields // Computers and Electronics in Agriculture. 2020. vol. 171. no. 105303.
23. Ulaby F., Bativala P., Dobson M. Microwave backscatter dependence on surface roughness, soil moisture, and soil texture: Part I-Bare soil // IEEE Transactions on Geoscience Electronics. 1978. vol. 16. no. 4. pp. 286–295.
24. Дубровин К.Н., Степанов А.С., Верхогуров А.Л., Асеева Т.А. Идентификация сельскохозяйственных культур с использованием радарных изображений // Информатика и автоматизация. 2022. Т. 21. № 2. С. 405–426.
25. Robertson L.D., Davidson A.A., McNairn H., Hosseini M., Mitchell S. Assessment of Multi-Frequency SAR for Crop Type Classification and Mapping // IGARSS-2019 IEEE International Geoscience and Remote Sensing Symposium. 2019. pp. 489–492.
26. Dubrovin K., Stepanov A., Verkhoturourov A. Cropland Mapping Using Sentinel-1 Data in the Southern Part of the Russian Far East // Sensors. 2023. vol. 23(18). no. 7902.

**Верхогуров Андрей Леонидович** — старший научный сотрудник, лаборатория информационных и вычислительных систем, Вычислительный центр Дальневосточного отделения Российской академии наук (ВЦ ДВО РАН). Область научных интересов: разработка информационных систем обработки спутниковых данных для исследования (мониторинга) состояния природных и сложных технических систем, обработка данных радиолокационной интерферометрии, геоинформационные системы. Число научных публикаций — 51. andrey@ccfebras.ru; улица Ким Ю Чена, 65, 680000, Хабаровск, Россия; р.т.: +7(4212)227-267.

**Степанов Алексей Сергеевич** — д-р фармацевт. наук, ведущий научный сотрудник, лаборатория селекции зерновых и колосовых культур, Дальневосточный научно-исследовательский институт сельского хозяйства (ДВ НИИСХ). Область научных интересов: сельскохозяйственная экономика прогнозирование урожайности

сельскохозяйственных культур, математическое моделирование в сельском хозяйстве. Число научных публикаций — 98. [stepanfx@mail.ru](mailto:stepanfx@mail.ru); улица Клубная, 13, 680521, Восточное, Россия; р.т.: +7(924)210-9102.

**Илларионова Любовь Викторовна** — канд. физ.-мат. наук, старший научный сотрудник, лаборатория численных методов математической физики, Вычислительный центр Дальневосточного отделения Российской академии наук (ВЦ ДВО РАН). Область научных интересов: машинное обучение, программирование, численные методы. Число научных публикаций — 37. [illarionova\\_l@list.ru](mailto:illarionova_l@list.ru); улица Ким Ю Чена, 65, 680000, Хабаровск, Россия; р.т.: +7(924)200-494-037.

A. VERKHOTUROV, A. STEPANOV, L. ILLARIONOVA  
**USING SAR DATA FOR MONITORING OF AGRICULTURAL  
CROPS IN THE SOUTH OF THE RUSSIAN FAR EAST**

*Verkhoturov A., Stepanov A., Illarionova L. Using SAR Data for Monitoring of Agricultural Crops in the South of the Russian Far East.*

**Abstract.** The use of SAR data to monitoring agricultural crops is a promising area of research designed to complement existing methods and technologies based on the analysis of multispectral images. The main advantages of vegetation indices calculated from SAR data include their sensitivity to the polarimetric properties of the backscatter intensity, its scattering characteristics, and independence from cloud cover. This is especially important for the territory of the south of the Russian Far East, whose monsoon climate provides humid and cloudy weather during the period when crops gain maximum biomass. For arable lands in the Khabarovsk Territory and the Amur Region, a total of 64 Sentinel-1 SAR images were obtained from May to October 2021. For each date, the values of the DpRVI, RVI, VH/VV indices were calculated and time series were constructed for the entire observation period for individual fields (342 fields in total). NDVI time series were constructed from Sentinel-2 multispectral images using a cloud mask. The characteristics of time series extremes were calculated for different types of arable land: soybeans, oats, and fallows. It was shown that for each crop the seasonal curves DpRVI, RVI, VH/VV had a characteristic appearance. It was found that the DpRVI demonstrated the highest stability – the coefficients of variation of the seasonal variation of DpRVI were significantly lower than those for RVI and VH/VV. It was also revealed that the similarity between the curves of these indices remained for regions quite distant from each other – the Khabarovsk Territory and the Amur Region. The main characteristics of the seasonal variation of time series of radar indices were calculated in comparison with NDVI – the magnitude of the maximum, the date of the maximum and the values of the coefficient of variation for these indicators. It was found, firstly, that the values of these indicators in different regions are similar to each other; secondly, the variability of the maximum and the day of the maximum for DpRVI is lower than for RVI and VH/VV; thirdly, the variability of the maximum and the day of the maximum for DpRVI is comparable to NDVI. Thus, time series of radar indices DpRVI, RVI, VH/VV for the main types of agricultural lands in the south of the Far East have distinctive features and can be used in classification problems, yield modeling and crop rotation control.

**Keywords:** remote sensing data, Far East, agricultural land monitoring, radar vegetation indices, variability, arable land, crops, time series.

## References

1. Yakushev V.P., Zakharyan Yu.G., Blokhina S.Yu. [Current problems and prospects for the use of remote sensing of the Earth in agriculture]. *Sovremennye Problemy Distantzionnogo Zondirovaniya Zemli iz Kosmosa – Modern problems of remote sensing of the Earth from space.* 2022. vol. 19. no. 1. pp. 287–294. (In Russ.).
2. Fisette T., Rollin P., Aly Z., Campbell, L., Daneshfar, B., Filyer, P., Smith A., Davidson A., Shang J., Jarvis I. AAFC annual crop inventory. *Second International Conference on Agro-Geoinformatics (Agro-Geoinformatics).* 2013. pp. 270–274.
3. Loupian E.A., Bartalev S.A., Tolpin V.A., Krashennikova Ju.S., Oksjukevich A.Ju. [VEGA satellite service applications in regional remote monitoring systems]. *Sovremennye Problemy Distantzionnogo Zondirovaniya Zemli iz Kosmosa – Modern*

- problems of remote sensing of the Earth from space. 2014. vol. 11. no. 3. pp. 215–232. (In Russ.).
4. Loupian E.A., Proshin A.A., Bourtsev M.A., Kashnickij A.V., Balashov I.V., Bartalev S.A., Bril' A.A., Egorov V.A., Zharko V.O., Konstantinova A.M., Kobec D.A., Mazurov A.A., Marchenkov V.V., Matveev A.M., Miklashevich T.S., Plotnikov D.E., Radchenko M.V., Stycenko F.V., Sychugov I.G., Tolpin V.A., Uvarov I.A., Hvostikov S.A., Hovratovich T.S. [Vega-Science system: design features, main capabilities and usage experience]. *Sovremennye Problemy Distantionnogo Zondirovaniya Zemli iz Kosmosa – Modern problems of remote sensing of the Earth from space*. 2021. vol. 18. no. 6. pp. 9–31. (In Russ.).
  5. Denisov P.V., Troshko K.A., Loupian E.A., Tolpin V.A. [Potential and experience of Vega-PRO information system use for monitoring of agricultural lands]. *Vychislitel'nye tehnologii – Computing technologies*. 2022. vol. 27. no. 3. pp. 66–83. (In Russ.).
  6. Macelloni G., Paloscia S., Pampaloni P., Ruisi R., Dechambre M., Valentin R., Chanzy A., Prevot L., Bruguier N. Modelling radar backscatter from crops during the growth cycle. *Agronomie*. 2002. vol. 22. № 6. pp. 575–579.
  7. Blaes X., Defourny P., Wegmuller U., Della Vecchia A., Guerriero L., Ferrazzoli P. C-band polarimetric indexes for maize monitoring based on a validated radiative transfer model. *IEEE Transactions on Geoscience and Remote Sensing*. 2006. vol. 44. no. 4. pp. 791–800.
  8. McNairn H., Champagne C., Shang J., Holmstrom D., Reichert G. Integration of optical and Synthetic Aperture Radar (SAR) imagery for delivering operational annual crop inventories. *ISPRS Journal of Photogrammetry and Remote Sensing*. 2009. vol. 64. no. 5. pp. 434–449.
  9. Mercier A., Betbeder J., Baudry J., Le Roux V., Spicher F., Lacoux J., Roger D., Hubert-Moy L. Evaluation of Sentinel-1 & 2 time series for predicting wheat and rapeseed phenological stages. *ISPRS Journal of Photogrammetry and Remote Sensing*. 2020. vol. 163. pp. 231–256.
  10. Li M., Bijker W. Potential of Multi-Temporal Sentinel-1A Dual Polarization SAR Images for Vegetable Classification in Indonesia. *IEEE International Geoscience and Remote Sensing Symposium*. 2018. pp. 3820–3823.
  11. Harfenmeister K., Itzerott S., Weltzien C., Spengler D. Detecting Phenological Development of Winter Wheat and Winter Barley Using Time Series of Sentinel-1 and Sentinel-2. *Remote Sensing*. 2021. vol. 13(24). no. 5036.
  12. Bao X., Zhang R., Lv J., Wu R., Zhang H., Chen J., Zhang B., Ouyang X., Liu G. Vegetation descriptors from Sentinel-1 SAR data for crop growth monitoring. *ISPRS Journal of Photogrammetry and Remote Sensing*. 2023. vol. 203(17). pp. 86–114.
  13. 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. no. 8. pp. 2519–2527.
  14. 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.
  15. Kumar S., Rao S., Sharma J. Radar Vegetation Index as an Alternative to NDVI for Monitoring of Soyabean and Cotton. *Proceedings of the XXXIII INCA International Congress (Indian Cartographer)*. 2013. vol. 33. pp. 91–96.
  16. Nasirzadehdizaji R., Balik Sanli F., Abdikan S., Cakir Z., Sekertekin A., Ustuner M. Sensitivity Analysis of Multi-Temporal Sentinel-1 SAR Parameters to Crop Height and Canopy Coverage. *Applied Sciences*. 2019. vol. 9(4). no. 655.
  17. Ratha D., Mandal D., Kumar V., McNairn H., Bhattacharya A., Frery A.C. A Generalized Volume Scattering Model-Based Vegetation Index From Polarimetric



- SAR Data. IEEE Geoscience and Remote Sensing Letters. 2019. vol. 16. no. 11. pp. 1791–1795.
18. Mandal D., Ratha D., Bhattacharya A., Kumar V., McNairn H., Rao Y.S., Frery A.C. A Radar Vegetation Index for Crop Monitoring Using Compact Polarimetric SAR Data. IEEE Transactions on Geoscience and Remote Sensing. 2020. vol. 58. no. 9. pp. 6321–6335.
  19. 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. no 12. pp. 7102–7108.
  20. 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.
  21. Mandal D., Kumar V., Ratha D., Dey S., Bhattacharya A., Lopez-Sanchez J. M., McNairn H., Rao Y.S. Dual polarimetric radar vegetation index for crop growth monitoring using Sentinel-1 SAR data. Remote Sensing of Environment. 2020. vol. 247. no. 111954.
  22. Sekertekin A., Marangoz A.M., Abdikan S. ALOS-2 and Sentinel-1 SAR data sensitivity analysis to surface soil moisture over bare and vegetated agricultural fields. Computers and Electronics in Agriculture. 2020. vol. 171. no. 105303.
  23. Ulaby F., Batlivala P., Dobson M. Microwave backscatter dependence on surface roughness, soil moisture, and soil texture: Part I-Bare soil. IEEE Transactions on Geoscience Electronics. 1978. vol. 16. no. 4. pp. 286–295.
  24. Robertson L.D., Davidson A.A., McNairn H., Hosseini M., Mitchell S. Assessment of Multi-Frequency SAR for Crop Type Classification and Mapping. IGARSS-2019 IEEE International Geoscience and Remote Sensing Symposium. 2019. pp. 489–492.
  25. Dubrovin K.N., Stepanov A.S., Verkhoturov A.L., Aseeva T.A. [Crop identification using radar images]. Informatika i avtomatizacija –Informatics and Automation. 2022. vol. 21. no. 2. pp. 405–426. (In Russ.).
  26. 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). no. 7902.

**Verkhoturov Andrey** — Senior researcher, Laboratory of information and computational systems, Computing Center of the Far Eastern Branch of the Russian Academy of Sciences (CC FEB RAS). Research interests: processing of Earth remote sensing data, processing of radar interferometry data, geoinformation systems. The number of publications — 51. andrey@ccfebras.ru; 65, Kim Yu Chen St., 680000, Khabarovsk, Russia; office phone: +7(4212)227-267.

**Stepanov Aleksey** — Ph.D., Dr.Sci., Leading researcher, Laboratory of breeding cereals and ear crops, Far Eastern Research Institute of Agriculture (FEARI). Research interests: agricultural economics, forecasting the yield of crops, mathematical modeling in agriculture. The number of publications — 98. stepanfx@mail.ru; 13, Clubnaya St., 680521, Vostochnoye, Russia; office phone: +7(924)210-9102.

**Illarionova Lyubov** — Ph.D., Senior researcher, Laboratory of numerical methods of mathematical physics, Computing Center of the Far Eastern Branch of the Russian Academy of Sciences (CC FEB RAS). Research interests: machine learning, numerical methods. The number of publications — 37. illarionova\_l@list.ru; 65, Kim Yu Chen St., 680000, Khabarovsk, Russia; office phone: +7(924)200-494-037.