Технология совместного анализа временных рядов изображений интерферометрической когерентности Sentinel-1 и вегетационного индекса по данным Sentinel-2 для мониторинга сельскохозяйственных полей

Т. Н. Чимитдоржиев^{1,2}, А. В. Дмитриев¹, П. Н. Дагуров¹

¹ Институт физического материаловедения СО РАН, Улан-Удэ, 670047, Россия E-mail: tchimit@gmail.com

² Научно-исследовательский институт аэрокосмического мониторинга «АЭРОКОСМОС», Москва, 105064, Россия

В работе на примере тестового участка в Республике Бурятия представлены возможности комплексного использования радарных изображений в С-диапазоне длин волн и спектрозональных оптических снимков для мониторинга земель в сельскохозяйственном обороте. Для оценки динамики пахотных земель и сельскохозяйственных культур использованы временные ряды радиолокационных данных интерферометрической когерентности и изображений вегетационного индекса MSAVI. Интерферометрическая когерентность получена по данным спутникового радиолокатора Sentinel-1 с периодичностью 12 дней с 04.04.2019 по 25.10.2019. Вегетационный индекс рассчитан по мультиспектральным снимкам Sentinel-2 в безоблачную погоду. При помощи кластерного анализа временных рядов изображений интерферометрической когерентности выделены три класса полей: пашни под парами с несколькими минимумами когерентности в период изменения поверхностной структуры поля и сельскохозяйственные поля со схожей динамикой когерентности в вегетационный период с двумя различными 12-дневными периодами локальных минимумов в период посевной обработки. По аналогии с когерентностью при помощи алгоритма кластеризации ISODATA и с применением «маски» пахотных полей временной ряд изображений MSAVI был сегментирован на три класса: пашни под парами и два класса полей с максимальными значениями индекса порядка 0,3 и 0,4. Сравнительный анализ временных рядов когерентности и индекса вегетации был выполнен по данным после 22 мая, чтобы исключить время посевной с аномальными значениями когерентности. Обнаружена отрицательная корреляция порядка –0,8 между значениями когерентности и индексом вегетации для полей с сельскохозяйственными культурами после посева и до уборки урожая. Полученные результаты позволяют рассмотреть технологию оценки интерферометрической когерентности сельскохозяйственных полей как некоторую альтернативу традиционному анализу динамики значений вегетационных индексов для мониторинга и оценки состояния посевов.

Ключевые слова: интерферометрическая когерентность, вегетационный индекс, временные ряды, сельскохозяйственные поля

Одобрена к печати: 22.06.2020 DOI: 10.21046/2070-7401-2020-17-4-61-72

Введение

Запуск спутников Sentinel-1A/В и Sentinel-2A/В с периодичностью съёмки 3–12 дней и пространственным разрешением порядка 10 м вкупе со свободным доступом к данным создал беспрецедентные возможности для мониторинга земной поверхности. На основе этих данных разработаны различные цифровые онлайн-платформы дистанционного мониторинга антропогенных и природных ландшафтов, в том числе и сельскохозяйственной направленности, такие как Sen2-Agri (http://www.esa-sen2agri.org/), Onesoil (https://onesoil.ai/) и др. Платформа Sen2-Agri предполагает использование оптических мультиспектральных снимков спутников Sentinel-2A/В и Landsat-8 для мониторинга (Defourny et al., 2019). Бесплатная платформа для точного земледелия Onesoil помимо мультиспектральных сенсоров Sentinel-2A/В использует также радиолокационные изображения Sentinel-1A/В, что позволяет уточнить информацию. Появление и развитие таких онлайн-сервисов, использующих доступные спутниковые снимки, предполагает соответствующее развитие новых методов и технологий анализа и обработки данных дистанционного зондирования оптического и микроволнового диапазонов длин волн.

В России традиционно мониторинг сельскохозяйственных полей проводится на основе мультиспектральных снимков, и, соответственно, значительная часть разработок в этой области создана для анализа и обработки данных оптического диапазона. В 2019 г. этой актуальной теме был посвящён тематический выпуск журнала Института космических исследований Российской академии наук (ИКИ РАН) «Современные проблемы дистанционного зондирования Земли из космоса» и соответствующий обзор (Якушев и др., 2019). В этом обзоре также были представлены существующие российские геопорталы, функционирующие на основе данных дистанционного зондирования Земли (ДЗЗ) и специализирующиеся на обработке спутниковых снимков оптического диапазона.

Сходная ситуация сложилась за рубежом. Так, в метаобзоре (Weiss et al., 2020) приведён анализ обзорных статей за 1987–2018 гг., индексируемых в базе данных Web of Science Core collection, по тематике дистанционного зондирования в сельском хозяйстве. Представленные цифры демонстрируют увеличение подобных обзоров с 2015 г., а также повышение цитируемости с 2015 г., что связано с запуском Sentinel-2А. Как и следовало ожидать, значительная часть биофизических параметров сельскохозяйственных культур оценивается в мире при помощи оптических активных (лидары) и пассивных гипер- и мультиспектральных сенсоров. Микроволновые радиометры и радиолокаторы используются в большей степени для изучения влажности почвы, в меньшей степени — для количественной оценки индекса листовой поверхности LAI (англ. Leaf Area Index). Что касается основных приложений ДЗЗ, то в приведённом выше метаобзоре выделены следующие пространственно-временные критерии, которым должны удовлетворять данные ДЗЗ для полноценного мониторинга: близость к реальному времени (оперативность) и регулярность, возможность оценки основных фенологических циклов сельскохозяйственных посевов и формирования долговременных рядов наблюдений. Последнее вполне реализуемо и предполагает использование данных свободного доступа Sentinel-1А/В, Sentinel-2А/В и Landsat-8. Помимо этого, оптические мультиспектральные снимки Sentinel-2A/В и Landsat-8, как известно (Weiss et al., 2020), позволяют оценить биофизические параметры сельскохозяйственных посевов в различные вегетационные периоды.

Регулярность и оперативность получения спутниковых изображений в оптическом диапазоне зависит от облачности. Например, как показано в работе (Tonooka, Tachikawa, 2019), временное покрытие облачным покровом территории России существенно. В частности, для территории Бурятии приведённая статистика демонстрирует, что более 50 % изображений Terra/MODIS за период с марта 2000 г. по август 2019 г. непригодны для анализа из-за облачного покрова. В то же время периодичность всепогодной радиолокационной съёмки Sentinel-1A/B для Европы составляла 2–3 дня в 2017 г. (Koetz, 2018), в настоящее время — 5–6 дней. Для других территорий, включая Сибирь и Дальний Восток, — 12 дней (Whelen, Siqueira, 2018). Указанный цикл съёмки Sentinel-1 существенно увеличивает возможности оперативного мониторинга, а при совместном использовании данных Sentinel микроволнового и оптического диапазонов периодичность съёмки может составлять в некоторых случаях 2–3 дня.

В настоящей работе представлены возможности комплексного использования радарных изображений С-диапазона Sentinel-1 и спектрозональных оптических снимков Sentinel-2 для оценки земель в сельскохозяйственном обороте с выделением пашни под парами и классификацией сельскохозяйственных полей по времени посевных работ. С другой стороны, форма представления материала позволяет рассмотреть технологию оценки интерферометрической когерентности сельскохозяйственных полей как некоторую альтернативу традиционному анализу динамики значений вегетационных индексов для мониторинга и оценки состояния посевов.

Описание тестового участка

Тестовые сельскохозяйственные поля расположены в Бичурском р-не Республики Бурятия и на *рис.* 1 выделены тремя цветами, соответствующими трём различным классам полей. Описание классов будет приведено ниже. Климат в районе суровый, резко континентальный, с большой суточной и сезонной разницей температуры. Колебания ночной и дневной температуры воздуха значительны в течение всего вегетационного периода, который длится 160 дней. В это время выпадает наибольшее количество осадков — до 60 %. Среднее многолетнее количество осадков за год не превышает 349 мм. Зимние осадки составляют не более 10 % от годового количества, что определяется малой мощностью снежного покрова, высота которого колеблется от 1 до 13 см. Это способствует промерзанию почвы до 3 м. Поздние весенние заморозки удерживаются до конца мая, иногда — до 1-й декады июня. Продолжительность безморозного периода в среднем составляет 77–126 дней. Цикл вегетации у степных растений очень своеобразный и зависит от влажности почвы. В засушливое лето у многих степных растений максимальный рост наблюдается в июне – июле.



Рис. 1. Расположение тестовых сельскохозяйственных полей. Республика Бурятия, Бичурский р-н, с. Малый Куналей

Методология анализа и используемые данные

Динамику деформаций и практически любые пространственные изменения земной поверхности в целом можно оценить при помощи радиолокационной интерферометрии (Chimitdorzhiev et al., 2016; Pepe, Calò, 2017; Xue et al., 2020) и когерентности (Pulella et al., 2020; Wang et al., 2020) радиолокационных сигналов. При этом интерферометрическая фаза, как правило, используется в случае, когда когерентность превышает величину 0,20±0,02. При когерентности менее этого порогового значения поверхностная отражающая структура изменяется существенно, а интерферометрические фазовые измерения деформаций земной поверхности не выполняются вследствие увеличения погрешности измерений. Интерферометрическая когерентность двух комплексных радарных изображений *z*₁ и *z*₂ определяется как амплитуда комплексного коэффициента корреляции:

$$\gamma = \frac{\left|\left\langle z_1 \cdot z_2^* \right\rangle\right|}{\sqrt{\left\langle \left|z_1\right|^2 \right\rangle \cdot \left\langle \left|z_2\right|^2 \right\rangle}},\tag{1}$$

где $\langle \cdot \rangle$ — операция усреднения; * — комплексно-сопряжённое число, $0 \le \gamma \le 1$.

Увеличение временной декорреляции в случае разновременных радарных изображений z₁ и z₂ свидетельствует о существенном изменении отражённого радиолокационного сигнала (амплитуды и фазы). Временная декорреляция, в свою очередь, указывает на изменение поверхностной структуры почвы в случае сельскохозяйственных полей: вспашку, боронование, культивацию и т.д. Однако причины декорреляции радиолокационного эхосигнала на разных поляриметрических комбинациях могут быть различными. Например, в работе (Чимитдоржиев, 2007) показано, что в случае кросс-поляризации наряду с временной декорреляцией, связанной с изменением структуры поверхности за время между съёмками, низкие величины когерентности отмечаются для участков, шероховатость которых мала по сравнению с длиной волны. В подобных случаях отсутствует деполяризация, радарный эхосигнал в значительной степени отражается зеркально в противоположную сторону от радара и сопоставим с шумовой компонентой. По указанной причине следует использовать согласованную поляризацию для мониторинга динамики поверхностной структуры сельскохозяйственных полей при помощи интерферометрической когерентности, например в случае Sentinel-1А/В — вертикальную на излучение/приём (VV). Подробное описание технических характеристик Sentinel-1А/В и Sentinel-2А/В и приборов, установленных на этих спутниках, представлено сайте Европейского космического агентства (англ. European Space Agency — ESA) (https://sentinels.copernicus.eu/web/sentinel/user-guides).

Nº	Дата (UTC)	Абсолютная орбита	Температура, °С	Осадки	
1	04.04.2019	15663	-2,8	_	
2	16.04.2019	15838	-1,7	_	
3	28.04.2019	16013	3,6	дождь	
4	10.05.2019	16188	0,7	_	
5	22.05.2019	16363	17,6	—	
6	03.06.2019	16538	8,2	_	
7	15.06.2019	16713	19,2	_	
8	27.06.2019	16888	13,2	дождь	
9	09.07.2019	17063	19,1	_	
10	21.07.2019	17238	18,6	_	
11	02.08.2019	17413	15,9	_	
12	14.08.2019	17588	13,6	_	
13	26.08.2019	17763	14,1	дождь	
14	07.09.2019	17938	7,1	_	
15	19.09.2019	18113	3,4	_	
16	01.10.2019	18288	0,8	_	
17	13.10.2019	18463	-10,8	_	
18	25.10.2019	18638	-5,2		

D V	~ ~		C / 1 1D
Впеменнои	пал изорражении	палиолокатора	Sentinel-IR
Demennion	рлд пооражении	раднолокатора	Seminer 1D

Для анализа динамики поверхностной структуры сельскохозяйственных полей будем использовать временные ряды интерферометрической когерентности, полученной из радиолокационных изображений Sentinel-1 по формуле (1), с 12-дневным интервалом между z_1 и z_2 (*таблица*). Поскольку на величину обратного радарного рассеяния и, соответственно, на значение когерентности влияет процесс оттаивания/замерзания почвы и изменение влажности почвы (Muzalevskiy, 2019), то по возможности следует учитывать температуру окружающего воздуха и осадки (см. *таблицу*).

Результаты и обсуждение

Для создания изображения когерентности радиолокационные данные на согласованной вертикальной поляризации были совмещены при помощи попиксельного корреляционного анализа. Фрагменты данных изображений представлены на *рис. 2.* Здесь цифрами в формате ХХҮҮ (ХХ — месяц 2019 г., ҮҮ — день месяца) обозначены временные промежутки, по которым выполнена оценка временной декорреляции.



0404-0416

0416-0428

0428-0510



0510-0522

0522-0603

0603-0615



0615-0627

0627-0709

0709-0721





0721-0802

0802-0814

0814-0826







0826-0907

0907-0919

0919-1001



1001-1013 1013-1025 *Рис. 2.* Фрагменты изображений интерферометрической когерентности (окончание; начало см. на с. 65)

Анализ изображений когерентности на *рис. 2* показывает, что низкие площадные значения когерентности сельскохозяйственных полей (порядка 0,1 и менее) соответствуют временному диапазону с 28 апреля по 5 мая 2019 г. В этот период началась механизированная обработка полей для посева. Для промежутка времени с 15 по 27 июня общая низкая когерентность по фрагменту связана с достаточно обильными осадками перед повторной съёмкой 27 июня (см. *таблицу*) и соответствующей декорреляцией вследствие слоистой влажности почв (Rabus et al., 2010; Zwieback et al., 2015).

Показанные на *рис. 3* композиты являются простым способом визуальной интерпретации. Например, синий цвет означает, что когерентность в третий временной промежуток была выше, чем в предыдущие два. Следовательно, в данном примере низкие значения когерентности свидетельствуют о значительных изменениях поверхностной структуры сельскохозяйственных полей в первые два временных промежутка, соответствующих красному и зелёному цветам. Подобная интерпретация становится только некоторой качественной оценкой и фактически представляет собой базовый продукт радиолокации (Дмитриев и др., 2014), который при дальнейшем пространственно-временном анализе позволил создать «маску» пахотных полей:

- расчёт коэффициента вариации (отношение стандартного отклонения к среднему) по временному ряду изображений интерферометрической когерентности;
- сегментация пахотных земель подбором пороговой величины коэффициента вариации;
- фильтрация для удаления одиночных пикселов и формирование «маски» пахотных полей.



Канал цвета	Даты	Канал цвета	Даты	Канал цвета	Даты
R (красный)	0428-0510	R (красный)	0603-0615	R (красный)	0709-0721
G (зелёный	0510-0522	G (зелёный	0615-0627	G (зелёный	0721-0802
В (синий)	0522-0603	В (синий)	0627-0709	В (синий)	0802-0814
a		<u> </u>		6	

Рис. 3. Ложноцветовые мультивременные композитные изображения интерферометрической когерентности

Рассмотрим временную динамику интерферометрической когерентности в период с апреля по октябрь 2019 г. Для этого проведём кластеризацию полей на классы по близким значениям когерентности на основе временного ряда изображений (см. таблицу). Предварительно для уменьшения спекл-шума на изображениях используем медианный фильтр с размером окна 5×5 пикселей, а также применим «маску» полей, где проводятся сельскохозяйственные мероприятия, связанные с изменением поверхностной структуры почвы. В итоге процедуры кластеризации при помощи стандартного алгоритма ISODATA получено 5 классов сельскохозяйственных полей с различной динамикой когерентности (рис. 4). На рис. 4 по оси абсцисс — временная шкала, по оси ординат — значения когерентности. На рис. 4а представлены кривые для 1-го и 2-го классов, которые характеризуются сходной динамикой с запаздыванием минимума когерентности на 12 дней: минимум для 1-го класса (значение когерентности 0,25) соответствует изменениям поверхности полей с 28 апреля по 10 мая 2019 г., минимум для 2-го класса (0,27) характеризует изменения с 10 по 22 мая 2019 г. В дальнейшем динамика временных рядов интерферометрической когерентности на рис. 4а в целом согласуется с результатами исследования (Khabbazan et al., 2019) для сельскохозяйственных культур и заключается в следующем:

- постепенный спад когерентности с увеличением объёма растительности и длительный период низкой когерентности с 15 июня по 14 августа 2019 г.
- в период созревания и уборки урожая с 14 августа по 1 октября 2019 г. отмечается постепенное возрастание когерентности, а после сбора урожая — её резкое увеличение.



Рис. 4. Динамика когерентности сельскохозяйственных полей

Динамике полей, соответствующих классам 3–5 на *рис. 46*, характерны относительно стабильные, по сравнению с классами 1 и 2, значения когерентности в посевной период и значительные перепады после, вплоть до окончания уборки урожая. Подобная временная динамика указывает фактически на один класс полей — пашни под парами, которые периодически перепахиваются для борьбы с сорной травой. Поэтому эти классы объединены в один класс 3. Расположение полей по итоговым трём классам представлено на *рис. 1*.

По аналогии с исследованием (Khabbazan et al., 2019) сравним полученные результаты по когерентности с соответствующими изображениями вегетационного индекса MSAVI (Modified Soil Adjusted Vegetation Index — модифицированный почвенный вегетационный индекс), рассчитанного по данным мультиспектральных оптических снимков Sentinel-2. Индекс MSAVI для сопоставления выбран по той причине, что он достаточно хорошо выделяет растительность на фоне «почвенного шума» (Qi et al., 1994), т.е. при низком проективном покрытии растительностью. Последнее существенно, поскольку при наклонном радиолокационном зондировании (локальные углы падения до 40° от надира) на величину обратного радарного рассеяния и, соответственно, когерентность, влияет объём надземной биомассы на единицу площади (Harfenmeister et al., 2019). После выбора безоблачных изображений Sentinel-2 для анализа использованы снимки, полученные 5 мая, 2 и 12 июля, 6 и 31 августа, 20 сентября, 5, 15 и 20 октября 2019 г. По аналогии с когерентностью при помощи алгоритма кластеризации ISODATA и с применением «маски» пахотных полей временной ряд изображений MSAVI был сегментирован на три класса. На рис. 5а (см. с. 69) показана средняя по классу временная динамика изменения вегетационного индекса на тестовых сельскохозяйственных полях. Классы 1 и 2 различаются по величине индекса (см. puc. 5a), это поля с сельскохозяйственными культурами. Класс 3 (значения порядка 0,1 и ниже) соответствует почве без растительного покрова и полностью совпадает с соответствующими классами 3-5 (объединены в класс 3 на рис. 1), полученными по результатам анализа временного ряда интерферометрической когерентности на рис. 46.

На *рис. 56, в* представлена временная динамика величин интерферометрической когерентности и значений вегетационного индекса MSAVI полей с сельскохозяйственными культурами для класса 1 (период сева с 28 апреля по 10 мая) и класса 2 (период сева с 10 по 22 мая 2019 г.). Поведение кривых когерентности и индекса на *рис. 56, в* прямо противоположно (изменяются в противофазе) в период вегетации, сбора урожая и после такового в рассматриваемый период времени, что также согласуется с данными из работы (Кhabbazan et al., 2019). Корреляция временных рядов составляет -0,79 (класс 1) и -0,82 (класс 2) и рассчитана по данным после 22 мая, чтобы исключить время посевной с аномальными значениями когерентности. Судя по графикам на *рис. 5*, значимым является определение времени площадной обработки почвы по локальному минимуму когерентности в период посевной и мониторинга пахотных полей под парами. Также не стоит исключать возможность выявления изменений влажности почвы по динамике когерентности в целом по изображению или его части (см. *рис. 2* в части 0615–0627).



Рис. 5. Динамика значений: *a* — индекса MSAVI для классов 1–3; *б*, *в* — интерферометрической когерентности и MSAVI полей с сельскохозяйственными культурами для классов 1 и 2

В случае оптического диапазона длин волн возрастание значений модернизированного вегетационного индекса MSAVI связано с увеличением величины проективного покрытия растительностью и соответствующим увеличением биомассы. Рост биомассы сельскохозяйственных культур увеличивает объёмную неоднородность, которая приводит к усилению декорреляции (уменьшению когерентности) за счёт рассеяния и переотражения радарного эхосигнала С-диапазона от изменяющихся элементов растительного слоя. Динамика последних, как известно, связана с изменением влажности сельскохозяйственных культур и увеличением их геометрических размеров.

Заключение

Таким образом, показаны возможности совместного использования временных рядов изображений спутниковой радиолокации Sentinel-1 и мультиспектральных снимков Sentinel-2 для мониторинга динамики полей в сельскохозяйственном обороте, включая пашни под парами, и классификацию сельскохозяйственных культур по времени посева и сбора урожая. Временные ряды интерферометрической когерентности и вегетационного индекса MSAVI для полей с сельскохозяйственными посевами имеют значительную отрицательную корреляцию порядка –0,8, за исключением временного промежутка посевной. Низкая площадная когерентность полей в этот период времени указывает на факт изменения поверхностной структуры почвы, т.е. подготовку и посадку сельскохозяйственных культур. В случае полей под парами минимумы когерентности позволяют определять время и площадь рекультивации, а также количество подобных мероприятий. Необходимо отметить единичный факт увеличения декорреляции по всему фрагменту изображения когерентности, связанный с обильными атмосферными осадками перед повторной радиолокационной съёмкой. В целом выполненное исследование показывает преимущества совместного использования мультиспектральных оптических и радиолокационных изображений С-диапазона. Например, необходимо отметить возможность аппроксимации временных рядов вегетационного индекса в длительные периоды облачности при помощи знания отрицательной корреляционной связи с величинами когерентности.

Дальнейшее развитие методики комплексирования оптико-микроволновых данных видится в создании технологии количественной оценки урожая сельскохозяйственных культур путём совместного учёта листового индекса LAI (проективного покрытия растительностью по вегетационным индексам) и объёма надземной фитомассы по величинам поляриметрического обратного радарного рассеяния и интерферометрической когерентности комплексных радиолокационных изображений.

Работа выполнена в рамках государственного задания № 0336-2019.0005 и при поддержке Российского фонда фундаментальных исследований, Министерства науки и технологий Китая (Ministry of Science and Technology — MOST) и Департамента науки и технологий Индии (Department of Science and Technology — DST) в рамках научного проекта № 19-55-80021.

Литература

- 1. Дмитриев А. В., Чимитдоржиев Т. Н., Гусев М. А., Дагуров П. Н., Емельянов К. С., Захаров А. И., Кирбижекова И. И. Базовые продукты зондирования Земли космическими радиолокаторами с синтезированной апертурой // Исслед. Земли из космоса. 2014. № 5. С. 83–91.
- 2. *Чимитдоржиев Т. Н.* Графическое обоснование применимости методики вычисления вегетационных индексов для обработки радарной интерферометрической когерентности // Исслед. Земли из космоса. 2007. № 3. С. 53–58.
- 3. *Якушев В. П., Дубенок Н. Н., Лупян Е. А.* Опыт применения и перспективы развития технологии дистанционного зондирования Земли для сельского хозяйства // Современные проблемы дистанционного зондирования Земли из космоса. 2019. Т. 16. № 3. С. 11–23.
- 4. *Chimitdorzhiev T.N., Dagurov P.N., Bykov M.E., Dmitriev A.V., Kirbizhekova I.I.* Comparison of ALOS PALSAR interferometry and field geodetic leveling for marshy soil thaw/freeze monitoring, case study from the Baikal lake region, Russia // J. Applied Remote Sensing. 2016. V. 10. No. 1. id. 016006. 12 p.
- Defourny P., Bontemps S., Bellemans N., Cara C., Dedieu G., Guzzonato E., Savinaud M. Near real-time agriculture monitoring at national scale at parcel resolution: Performance assessment of the Sen2-Agri automated system in various cropping systems around the world // Remote Sensing of Environment. 2019. V. 221. P. 551–568.
- 6. *Harfenmeister K., Spengler D., Weltzien C.* Analyzing Temporal and Spatial Characteristics of Crop Parameters Using Sentinel-1 Backscatter Data // Remote Sensing. 2019. V. 11. No. 13. id. 1569. 30 p.
- Khabbazan S., Vermunt P., Steele-Dunne S., Ratering Arntz L., Marinetti C., van der Valk D., Iannini L., Molijn R., Westerdijk K., van der Sande C. Crop monitoring using Sentinel-1 data: A case study from the Netherlands // Remote Sensing. 2019. V. 11. No. 16. id. 1887. 8 p.
- 8. *Muzalevskiy K. V.* Temperature dependence of the backscattering coefficient measured by ALOS PALSAR during cooling and heating of tundra topsoil // J. Radio Electronics (Zhurnal Radioelektroniki). 2019. No. 11. id 621.369.9 . 7 p.
- 9. *Pepe A., Calò F.* A review of interferometric synthetic aperture RADAR (InSAR) multi-track approaches for the retrieval of Earth's surface displacements // Applied Sciences. 2017. V. 7. No. 12. id. 1264. 39 p.
- 10. Pulella A., Aragão Santos R., Sica F., Posovszky P., Rizzoli P. Multi-temporal Sentinel-1 backscatter and coherence for rainforest mapping // Remote Sensing. 2020. V. 12. No. 5. id. 847. 17 p.
- Rabus B., When H., Nolan M. The Importance of Soil Moisture and Soil Structure for InSAR Phase and Backscatter, as Determined by FDTD Modeling // IEEE Trans. Geoscience and Remote Sensing. 2010. V. 48. No. 5. P. 2421–2429.

- 12. *Qi J.*, *Chehbouni A.*, *Huete A. R.*, *Kerr Y. H.*, *Sorooshian S.* A modified soil adjusted vegetation index // Remote Sensing of Environment. 1994. V. 48. No. 2. P. 119–126.
- 13. *Koetz B*. Sentinels for Agricultural Monitoring: Sen4CAP Concept and Goals. ESA, 2018. 51 p. URL: http://esa-sen4cap.org/sites/default/files/Sen4CAP_1stEvidence_DirectPaymentCommittee_March2018. pdf (accessed 17.06.2020).
- 14. *Tonooka H., Tachikawa T.* ASTER cloud coverage assessment and mission operations analysis using Terra/ MODIS cloud mask products // Remote Sensing. 2019. V. 11. No. 23. id. 2798. 18 p.
- 15. Wang S., Lu X., Chen Z., Zhang G., Ma T., Jia P., Li B. Evaluating the feasibility of illegal open-pit mining identification using InSAR coherence // Remote Sensing. 2020. V. 12. No. 3. id. 367. 15 p.
- 16. Weiss M., Jacob F., Duveiller G. Remote sensing for agricultural applications: A meta-review // Remote Sensing of Environment. 2020. V. 236. id. 111402. 19 p.
- 17. *Whelen T.*, *Siqueira P.* Time-series classification of Sentinel-1 agricultural data over North Dakota // Remote Sensing Letters. 2018. V. 9. No. 5. P. 411–420.
- 18. Xue F., Lv X., Dou F., Yun Y. A review of time-series interferometric SAR techniques: a tutorial for surface deformation analysis // IEEE Geoscience and Remote Sensing Magazine. 2020. V. 8. No. 1. P. 22–42.
- 19. Zwieback S., Hensley S., Hajnsek I. Assessment of soil moisture effects on L-band radar interferometry // Remote Sensing of Environment. 2015. V. 164. P. 77–89.

Technology of joint analysis of Sentinel-1 interferometric coherence time series and vegetation index based on Sentinel-2 data for monitoring agricultural fields

T. N. Chimitdorzhiev^{1,2}, A. V. Dmitriev¹, P. N. Dagurov¹

¹ Institute of Physical Materials Science SB RAS, Ulan-Ude 670047, Russia E-mail: tchimit@gmail.com ² ISR "AEROCOSMOS", Moscow 105064, Russia

The paper presents the possibilities of joint use of radar images in C-band and multispectral optical images for monitoring agricultural fields by the example of a test site in the Republic of Buryatia. Time series of radar interferometric coherence data and images of vegetation index MSAVI were used to assess the dynamics of arable land and agricultural crops. Interferometric coherence was obtained from the Sentinel-1 satellite radar with a 12 days interval from 04.04.2019 to 25.10.2019. The vegetation index was calculated using Sentinel-2 multispectral images in cloudless weather. Cluster analysis of interferometric coherence images time series made it possible to identify three classes of fields: arable land in fallow period with several coherence minima during the change in the surface structure of the field, and agricultural fields with similar coherence dynamics during the growing season with two different 12-day periods of local minima during the sowing period. By analogy with coherence, the time series of MSAVI images was segmented by means of ISODATA clustering algorithm and using the «mask» of arable fields into three classes: arable land in fallow period and two classes of fields with maximum index values not exceeding 0.3 and 0.4 respectively. A comparative analysis of the coherence time series and vegetation index was performed based on data after May 22 to exclude the time of sowing with abnormal coherence values. A negative correlation of about -0.8 was found between the coherence values and the vegetation index for fields with agricultural crops after sowing and before harvesting. The results obtained make it possible to consider the technology for evaluating the interferometric coherence of agricultural fields as an alternative to the traditional analysis of the vegetation index dynamics for monitoring and evaluating the state of crops.

Keywords: interferometric coherence, vegetation index, time series, agricultural fields

Accepted: 22.06.2020 DOI: 10.21046/2070-7401-2020-17-4-61-72

References

- 1. Dmitriev A. V., Chimitdorzhiev T. N., Gusev M. A., Dagurov P. N., Emel'yanov K. S., Zakharov A. I., Kirbizhekova I. I., Bazovye produkty zondirovaniya Zemli kosmicheskimi radiolokatorami s sintezirovannoi aperturoi (Basic products of earth sensing by space radars with synthetic aperture), *Issledovanie Zemli iz kosmosa*, 2014, No. 5, pp. 83–83.
- 2. Chimitdorzhiev T. N., Graficheskoe obosnovanie primenimosti metodiki vychisleniya vegetatsionnykh indeksov dlya obrabotki radarnoi interferometricheskoi kogerentnosti (Graphical justification of the applicability of the method for calculating vegetation indices for radar interferometric coherence processing), *Issledovanie Zemli iz kosmosa*, 2007, No. 3, pp. 53–58.
- 3. Yakushev V. P., Dubenok N. N., Loupian E. A., Opyt primeneniya i perspektivy razvitiya tekhnologii distantsionnogo zondirovaniya Zemli dlya sel'skogo khozyaistva (Earth remote sensing technologies for agriculture: application experience and development prospects), *Sovremennye problemy distantsionnogo zondirovaniya Zemli iz kosmosa*, 2019, Vol. 16, No. 3, pp. 11–23.
- 4. Chimitdorzhiev T. N., Dagurov P. N., Bykov M. E., Dmitriev A. V., Kirbizhekova I. I., Comparison of ALOS PALSAR interferometry and field geodetic leveling for marshy soil thaw/freeze monitoring, case study from the Baikal lake region, Russia, *J. Remote Sensing*, 2016, Vol. 10, No. 1, id. 016006, 12 p.
- 5. Defourny P., Bontemps S., Bellemans N., Cara C., Dedieu G., Guzzonato E., Savinaud M., Near realtime agriculture monitoring at national scale at parcel resolution: Performance assessment of the Sen2-Agri automated system in various cropping systems around the world, *Remote Sensing of Environment*, 2019, Vol. 221, pp. 551–568.
- 6. Harfenmeister K., Spengler D., Weltzien C., Analyzing Temporal and Spatial Characteristics of Crop Parameters Using Sentinel-1 Backscatter Data, *Remote Sensing*, 2019, Vol. 11, No. 13, id. 1569, 30 p.
- Khabbazan S., Vermunt P., Steele-Dunne S., Ratering Arntz L., Marinetti C., van der Valk D., Iannini L., Molijn R., Westerdijk K., van der Sande C., Crop monitoring using Sentinel-1 data: A case study from the Netherlands, *Remote Sensing*, 2019, Vol. 11, No. 16, id. 1887, 8 p.
- 8. Muzalevskiy K.V., Temperature dependence of the backscattering coefficient measured by ALOS PALSAR during cooling and heating of tundra topsoil, *J. Radio Electronics*, 2019, No. 11, id. UDC 621.369.9, 7 p.
- 9. Pepe A., Calò F., A review of interferometric synthetic aperture RADAR (InSAR) multi-track approaches for the retrieval of Earth's surface displacements, *Applied Sciences*, 2017, Vol. 7, No. 12, id. 1264, 39 p.
- 10. Pulella A., Aragão Santos R., Sica F., Posovszky P., Rizzoli P., Multi-temporal Sentinel-1 backscatter and coherence for rainforest mapping, *Remote Sensing*, 2020, Vol. 12, No. 5, id. 847, 17 p.
- 11. Rabus B., When H., Nolan M., The Importance of Soil Moisture and Soil Structure for InSAR Phase and Backscatter, as Determined by FDTD Modeling, *IEEE Trans. Geoscience and Remote Sensing*, 2010, Vol. 48, No. 5, pp. 2421–2429.
- 12. Qi J., Chehbouni A., Huete A. R., Kerr Y. H., Sorooshian S., A modified soil adjusted vegetation index, *Remote Sensing of Environment*, 1994, Vol. 48, No. 2, pp. 119–126.
- 13. Koetz B., *Sentinels for Agricultural Monitoring: Sen4CAP Concept and Goals*, ESA, 2018, 51 p., available at: http://esa-sen4cap.org/sites/default/files/Sen4CAP_1stEvidence_DirectPaymentCommittee_March2018.pdf (accessed 17.07.2020).
- 14. Tonooka H., Tachikawa T., ASTER cloud coverage assessment and mission operations analysis using Terra/MODIS cloud mask products, *Remote Sensing*, 2019, Vol. 11, No. 23, id. 2798, 18 p.
- 15. Wang S., Lu X., Chen Z., Zhang G., Ma T., Jia P., Li B., Evaluating the feasibility of illegal open-pit mining identification using InSAR coherence, *Remote Sensing*, 2020, Vol. 12, No. 3, id. 367, 15 p.
- 16. Weiss M., Jacob F., Duveiller G., Remote sensing for agricultural applications: A meta-review, *Remote Sensing of Environment*, 2020, Vol. 236, id. 111402, 19 p.
- 17. Whelen T., Siqueira P., Time-series classification of Sentinel-1 agricultural data over North Dakota, *Remote Sensing Letters*, 2018, Vol. 9, No. 5, pp. 411–420.
- 18. Xue F., Lv X., Dou F., Yun Y., A review of time-series interferometric SAR techniques: a tutorial for surface deformation analysis, *IEEE Geoscience and Remote Sensing Magazine*, 2020, Vol. 8, No. 1, pp. 22–42.
- 19. Zwieback S., Hensley S., Hajnsek I., Assessment of soil moisture effects on L-band radar interferometry, *Remote Sensing of Environment*, 2015, Vol. 164, pp. 77–89.