

С. Г. Мышляков (компания «Совзонд»)

В 2004 г. окончил Белорусский государственный университет по специальности «География». Работал в научно-исследовательском предприятии по землеустройству, геодезии и картографии «БелНИЦзем» (Минск, Беларусь). В настоящее время — руководитель отдела тематической обработки данных ДЗЗ компании «Совзонд».

Возможности радарных снимков Sentinel-1 для решения задач сельского хозяйства

Мы живем в эпоху открытых и доступных данных и открытого программного обеспечения. Каждый год на орбиту выводятся новые спутники, нацеленные на решение множества задач и ведущие съемку в различных диапазонах электромагнитного спектра. Каждый год в Интернете в свободном доступе появляются новые спутниковые данные.

3 апреля 2014 г. Европейское космическое агентство (European Space Agency, ESA) вывело на орбиту радиолокационный спутник Sentinel-1A (рис. 1). Он стал первым в космической группировке спутников по глобальному мониторингу окружающей среды и безопасности Copernicus. Sentinel-1A разработан компанией Thales Alenia Space. На его борту установлена радиолокационная аппаратура с синтезированной апертурой C-SAR (разработка компании Astrium), которая обеспечивает всепогодную, а также круглосуточную поставку космических снимков. Съемка выполняется в C-диапазоне (длина волны 6 см). Скорость передачи данных на наземный сегмент — 300 Мбит/сек. Характеристики режимов съемки приведены в табл. 1 [1]. Периодичность получения снимков

со спутника Sentinel-1A для российских широт составляет 5–15 дней.



Рис. 1. Общий вид спутника Sentinel-1A

Режимы	Ширина полосы обзора, км	Разрешение без обработки, м	Поляризация
Strip Map Mode	80	5x5	VV+VH или HH+HV
Interferometric Wide Swath	250	5x20	VV+VH или HH+HV
Extra-Wide Swath Mode	400	20x40	VV+VH или HH+HV
Wave-Mode	20x20	5x5	VV или HH

Табл. 1. Характеристики режимов съемки спутника Sentinel-1A

Разработка съемочной системы с такими характеристиками бросает вызов научному сообществу — какие новые задачи начнут решаться на основе бесплатных регулярно получаемых радиолокационных изображений? Учитывая все более возрастающий научный и практический интерес к реализации инфокоммуникационных технологий в сельском хозяйстве, в предлагаемом исследовании была поставлена цель — понять, как свободно распространяемые регулярные данные со спутников Sentinel-1 могут быть использованы для решения задач сельского хозяйства. Априори были выделены четыре задачи потенциального использования данных Sentinel-1:

- разработка и апробирование общей методики обработки радиолокационных данных ДЗЗ Sentinel-1 для задач сельского хозяйства;
- картографирование состава высеваемых культур, контроль севооборотов;
- мониторинг состояния растительности;
- мониторинг хода агротехнологических работ.

Исходя из общей теории радиолокации известно, что в основе формирования изображения лежат особенности отражения рассеивания испускаемого радарного сигнала различными типами поверхности [2]. Применительно к сельскохозяйственным задачам в роли поверхности выступают посеvy сельскохозяйственных культур и открытая распаханная почва. На совокупную итоговую интенсивность отражения сигнала (яркость пикселя) влияют биофизические характеристики растительности, такие,

как густота посевов, высота стеблей, расположение листьев. Поскольку съемка ведется со значительным углом отклонения от надира, имеет значение даже такой фактор, как направление распашки и сева. Так, интенсивность отражения сигнала у двух полей, засеянных культурой, одного и того же сорта, в одной фазе вегетации, но распаханых и засеянных под различными углами, будет отличаться (рис. 2). Огромное значение имеет фактор влажности почвенно-растительного покрова, определяющий его диэлектрическую проницаемость [3].

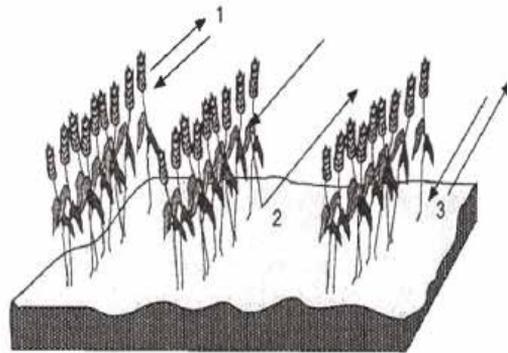


Рис. 2. Отражение радарного сигнала различными частями растений и почвой [4]

К преимуществам радарной съемки для решения сельскохозяйственных задач относятся:

- независимость от погодных условий;
- независимость от условий освещенности;
- чувствительность к биофизическим

(влажность, биомасса) и структурно-геометрическим особенностям почвенно-растительного покрова.

Недостатками радарных снимков являются:

- сложность тематической интерпретации;
- зашумленность данных;
- влияние рельефа и угла наклона;
- негативное влияние шероховатости поверхности.

Непосредственно перед запуском миссии Sentinel-1 Европейским космическим агентством совместно с компанией MDA (Канада) – лидером в области технологий радиолокационного ДЗЗ, — было проведено исследование по оценке возможностей использования снимков Sentinel-1 для целей сельского хозяйства [5]. В ходе проведенных исследований были оценены возможности различных поляриметрических режимов съемки, разработана методология обработки радиолокационных данных ДЗЗ в С-диапазоне для задач картографирования землепользования и мониторинга параметров сельскохозяйственной растительности, определен оптимальный угол визирования для мониторинга посевов и оптимальные параметры орбиты (восходящая или нисходящая), собраны и проанализированы эталонные сигнатуры сельскохозяйственных культур.

Результаты совместных исследований ESA и MDA позволили сделать следующие основные выводы:

- Возможна классификация сельскохозяйственных культур, базируясь лишь на данных с двойной поляризацией.
- Точность классификации посевов культур свыше 70% достигается при использовании пяти разновременных снимков, свыше 80% достигается при использовании семи разновременных снимков.
- Двойная поляризация VV+VH позволяет получать более точные результаты, чем двойная поляризация HH+HV.
- Лучшие результаты классификации

культур достигаются по летним снимкам (к августу — более 80%).

- Полная поляризация бывает полезна для детектирования стебельных культур (зерновые, кукуруза).
- Корреляция с NDVI, измеренного по снимкам RapidEye и по данным полевых измерений, наивысшая у рапса и бобовых.
- Поляризация VH в некоторой степени подходит для моделирования NDVI на ранних стадиях вегетации.

Исследование ESA и MDA проводилось для тестовых участков, расположенных в Канаде, Нидерландах и Испании. Начиная с 2015 года, юг европейской части России входит в план регулярной съемки Sentinel-1 в режиме Interferometric Wide Swath. Основные характеристики получаемых снимков следующие:

- пространственное разрешение 20x5 м (в продольном и азимутальном направлении);
- угол съемки 29-46 град.;
- двойная поляризация — VH и VV;
- полоса захвата 250 км;
- периодичность съемки — 5-12 дней (в зависимости от того, перекрывается виток или нет).

Исследования возможностей радарных снимков Sentinel-1 для сельского хозяйства применительно к условиям России были проведены для территории Новониколаевского района Волгоградской области, а точнее — на территорию полей ООО «Гелио-Пакс». В качестве исходных данных были использованы снимки уровня обработки GRD. Это означает, что значительная часть процедур предварительной обработки, таких, как проектирование из плоскости наклонной дальности в плоскость земной поверхности, для снимков уже проведена оператором [6]. Период наблюдений — с марта по ноябрь 2015 года. Данные о севооборотах за 2015 год любезно предоставлены со стороны ООО «Гелио-Пакс».

Для обработки радарных снимков было использовано программное обеспечение с открытым исходным кодом SNAP, разработанное Европейским космическим агентством. SNAP включает в себя панель Sentinel-Toolbox, специально предназначенную для обработки данных со спутников серии Sentinel. Следует отметить, что алгоритмы геообработки Sentinel-Toolbox доступны для использования посредством открытых библиотек GitHub, следовательно, могут быть достаточно легко интегрированы в сторонние приложения разработчиков по всему миру.

На исследуемую территорию с портала ESA были выкачаны все снимки за 2015 год. Всего с марта по ноябрь были получены сцены, соответствующие 18-ти датам наблюдений (вся территория района) и 36-ти датам (восточная часть), что говорит о беспрецедентной частоте получения данных. То есть, за редким исключением, новые снимки выкладывались с периодичностью 1 раз в 12 дней. Далее все скачанные сцены подвергались различным операциям предварительной обработки. Общая схема выполнения предварительной обработки приведена на рис. 3. На выходе получались откалиброванные масштабированные мозаики, готовые для проведения измерений интенсивности сигнала. Для наглядности и удобства визуального восприятия были сформированы псевдоцветные RGB-композиции, где красному каналу соответствует изображение в поляризации VV, зеленому каналу — изображение в поляризации VH, синему каналу — частное от деления изображений в поляризации VV и VH (рис. 4).

Для решения задачи классификации сельскохозяйственных культур и картографирования севооборотов требуется изучить характер интенсивности рассеивания радарного сигнала. Данная операция

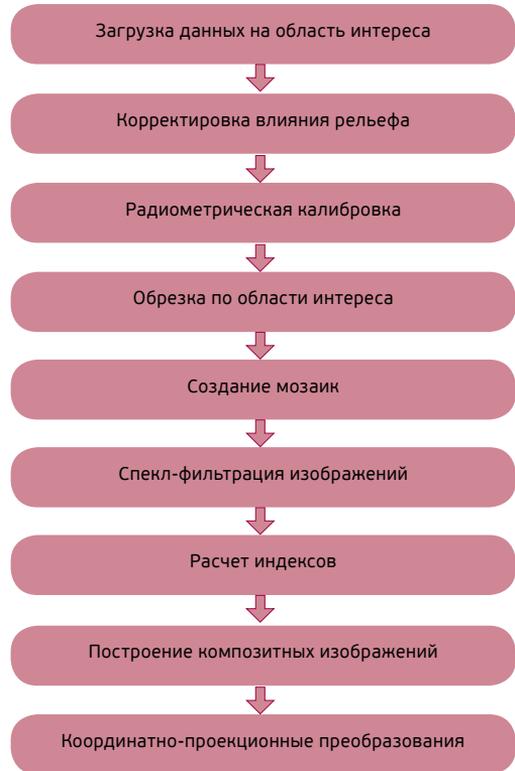


Рис. 3. Этапы предварительной обработки снимков Sentinel-1



Рис. 4. Образец обработанного снимка Sentinel-1. Дата съемки 20.07.2015 г. Композитное RGB-изображение: R — интенсивность сигнала в поляризации VV; G — интенсивность сигнала в поляризации VH; B — частное от деления интенсивности в поляризации VV на интенсивность в поляризации VH.

подобна изучению спектральной отражательной способности объектов при обработке оптико-электронных снимков. Для выполнения операции на заданной территории был заложен набор обучающих выборок (сигнатур) на основе имеющихся данных о севооборотах. Для каждой выборки, целиком попадающей в пределы отдельного поля, рассчитывались статистические показатели. На рис. 5 приведены результаты статистического анализа в виде кривых, отображающих изменение характера рассеивания радарного сигнала на разно-временных снимках.

Как видно из рис. 5, взаимная разделимость сигнатур основных классов культур оставляет желать лучшего. В отличие от оптико-электронных снимков обращает на себя внимание отсутствие последовательного хода графиков вегетации, соответствующего определенным фазам. В первую очередь это говорит о том, что на характер рассеивания сигнала влияют иные факторы, не всегда обусловленные биофизическими параметрами растительности. Проведенный анализ метеонаблюдений на ближайших метеостанциях на даты, соответствующие датам полученных снимков, показал, что одним из главных факторов, влияющих на интенсивность рассеивания сигнала на снимках Sentinel-1, является фактор влажности поверхности. Пиковые значения рассеивания, характерные для определенных дат наблюдений, соответствуют дням, в которые были зафиксированы осадки, либо непосредственно после дней с осадками.

Помимо анализа рассеивания радарного сигнала в двух поляризационных режимах в ходе исследования была предпринята попытка вывода нормализованного индекса, основанного на пространственном отношении поляризационных режимов. Для каждой даты были рассчитаны нормализованные индексы, так называемые «радарные NDVI».

$$\text{Radar NDVI} = \frac{VV-VH}{VV+VH}$$

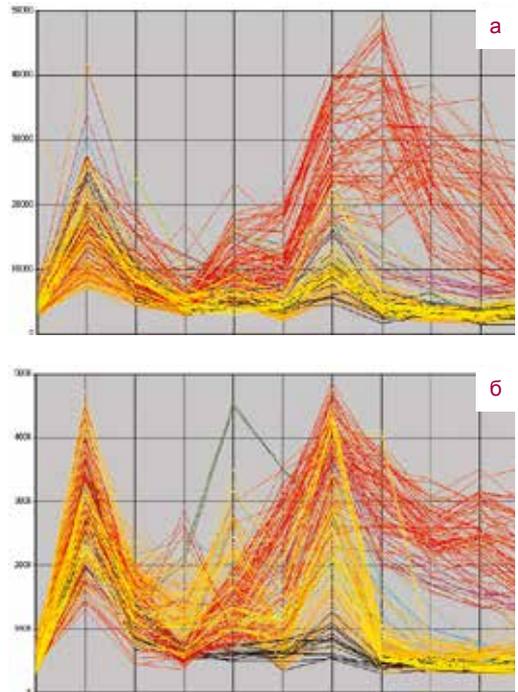


Рис. 5. Характер рассеивания радарного сигнала различными типами сельскохозяйственных культур. Ось X — даты съемки, ось Y — масштабированная интенсивность рассеивания радарного сигнала: а) временной ряд интенсивности сигнала в поляризации VV; б) временной ряд интенсивности сигнала в поляризации VH

- Озимая пшеница
- Яровая пшеница
- Ячмень
- Кукуруза
- Подсолнечник
- Горех
- Горчица
- Лен Масличный
- Нут

Расчет «радарных NDVI» в определенной степени позволяет компенсировать влияние фактора увлажнения. Графики «радарных NDVI» показали также хорошую разделимость озимых и яровых зерновых культур на ранних стадиях (май), что отчетливо видно на рис. 6. Пропашные культуры (подсолнечник и кукуруза) уверенно

отделяются во второй половине лета и начале осени, когда наблюдается активный прирост биомассы и для них характерны крупные размеры стеблей и листьев.

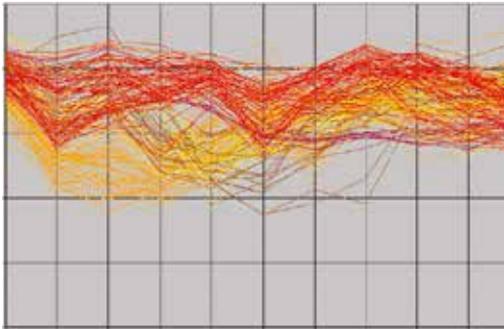


Рис. 6. Характер временного хода «радарного NDVI» для различных сельскохозяйственных культур. Ось X – даты съемки, ось Y – значения «радарного NDVI»

- Озимая пшеница
- Яровая пшеница
- Ячмень
- Кукуруза
- Подсолнечник
- Горох
- Горчица
- Лен Масличный
- Нут



Рис. 7. Отображение сельскохозяйственных полей на мультивременных композитах Sentinel-1:
 R – Дата съемки 29.07.2015;
 G – Дата съемки 23.06.2015;
 B – Дата съемки 30.05.2015.
 а) Изображения в поляризации VV;
 б) Изображения в поляризации VH

На рис. 7 приведены мультивременные композиты в различных поляризационных режимах. Из рисунка очевидна потенциальная возможность дистанционного распознавания различных сельскохозяйственных культур, основываясь на информации о рассеивании радарного сигнала, полученной со спутников Sentinel-1.

Одной из ключевых задач, решаемых при помощи данных ДЗЗ в интересах сельского хозяйства, является мониторинг и оценка состояния посевов сельскохозяйственных культур. К параметрам растительности и почв, потенциально доступным для наблюдения посредством радиолокационных изображений относятся [2]:

- тип культуры;
- фенологическая фаза культуры;

- содержание влаги в тканях растения;
- объем биомассы;
- проективное покрытие;
- высота стеблей;
- диаметр стеблей;
- направление и плотность распахки;
- влажность почвы;
- шероховатость поверхности;
- структура почвенного покрова.

Рассмотрим особенности рассеивания радарного сигнала отдельными типами

сельскохозяйственных культур на примере озимой и яровой пшеницы, ячменя, кукурузы и подсолнечника.

На рис. 8 приведены графики рассеивания радарного сигнала для озимой пшеницы. Обращают на себя внимание несколько резких скачков интенсивности рассеивания, особенно четко проявляющихся на снимках в поляризации VH. Как отмечалось выше, причиной аномально высоких значений и интенсивности является увлажненность растительного покрова и почвы. Даты, на которые приходятся пиковые значения (6 мая, 23 июня и 17 июля), характеризуются повышенным увлажнением поверхности, что следует из показаний метеонаблюдений ближайших метеостанций. В эти дни, либо непосредственно перед ними, шли дожди. Неравномерность распределения осадков и их влияние на растительность также может быть прослежена по радарным снимкам, что является темой для отдельного исследования. Применительно к анализу хода вегетации даты с аномально высокими значениями рекомендуется исключить.

На изображении «радарного NDVI» влияние влажности выражено не столь резко. По графикам хода «радарного NDVI» можно проследить закономерную тенденцию развития озимых культур. Максимальный объем зеленой биомассы, наблюдающийся у озимых культур в конце мая – начале июня (выход в трубку, колошение), соответствует минимальным значениям «радарного NDVI».

На рис. 9 представлены графики хода вегетации для яровой пшеницы. Также обращают на себя внимание повышенные значения интенсивности рассеивания радарного сигнала, соответствующие дождливым дням. Интерес представляет график хода «радарного NDVI». Как и для озимой пшеницы, здесь характерна обратная зависимость объема биомассы и интенсивности радарного сигнала. Наименьшие значения «радарного NDVI»

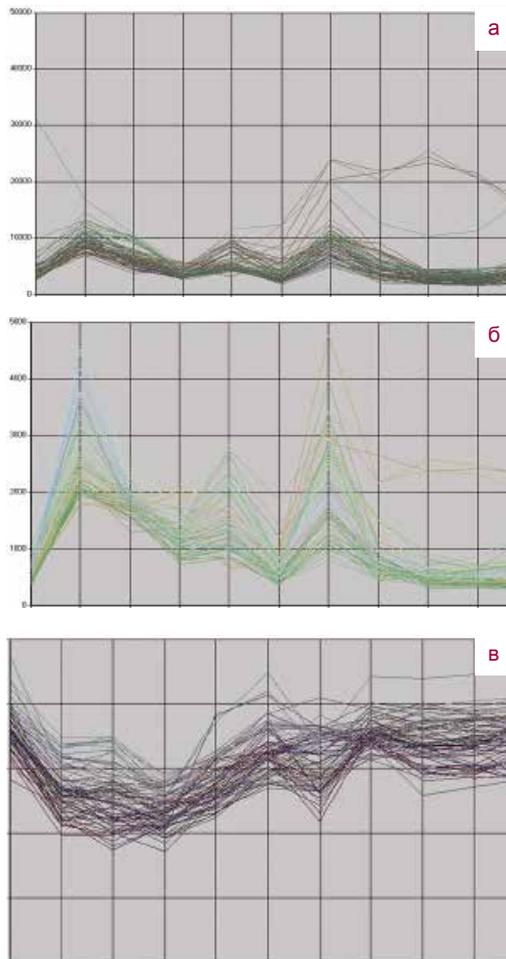


Рис. 8. Интенсивность рассеивания радарного сигнала посевами озимой пшеницы:
 а) Временной ряд интенсивности сигнала в поляризации VV;
 б) Временной ряд интенсивности сигнала в поляризации VH;
 в) Временной ряд «радарного NDVI»

приходятся на начало июля, что, как и в случае с озимыми, соответствует максимальным значениям биомассы. Графики хода вегетации ярового ячменя в целом схожи с аналогичными графиками для яровой пшеницы.

Графики хода вегетации подсолнечника сильно отличаются от графиков зерновых

культур (рис. 10). Прирост биомассы и связанные с ними процессы цветения и плодоношения обуславливают повышенные значения интенсивности рассеивания радарного сигнала в августе (в обоих поляризационных режимах, особенно в VH). «Радарный NDVI», в отличие от зерновых культур, не позволяет обнаружить каких-либо явных закономерностей. Поля под кукурузой обнаруживают устойчивую тенденцию к снижению значений «радарного NDVI» по мере роста и созревания.

Проведенное исследование позволило сделать следующие основные выводы:

- Радарные снимки Sentinel-1 пригодны для регулярного космического мониторинга сельскохозяйственного производства. Снимки гарантированно могут быть получены в заданное время, что обеспечивает ведение регулярных наблюдений. Нет риска отсутствия данных ввиду облачности и плохой освещенности. На качество изображений могут оказывать существенное влияние многие внешние факторы, в первую очередь, влажность почв и растительности.

- Дешифрирование основных групп сельскохозяйственных культур по радиолокационным снимкам Sentinel-1 возможно. Проведенное исследование показало возможность уверенного распознавания отдельных групп культур с возможностью математического описания их дешифровочных признаков. Возможна разработка алгоритма автоматизированного дешифрирования отдельных типов сельскохозяйственных культур

- Биофизические параметры роста и развития сельскохозяйственной растительности требуют дальнейшего глубокого изучения. Необходимо сопоставление данных по интенсивности рассеивания и «радарного NDVI» с фенологическими фазами развития растительности.

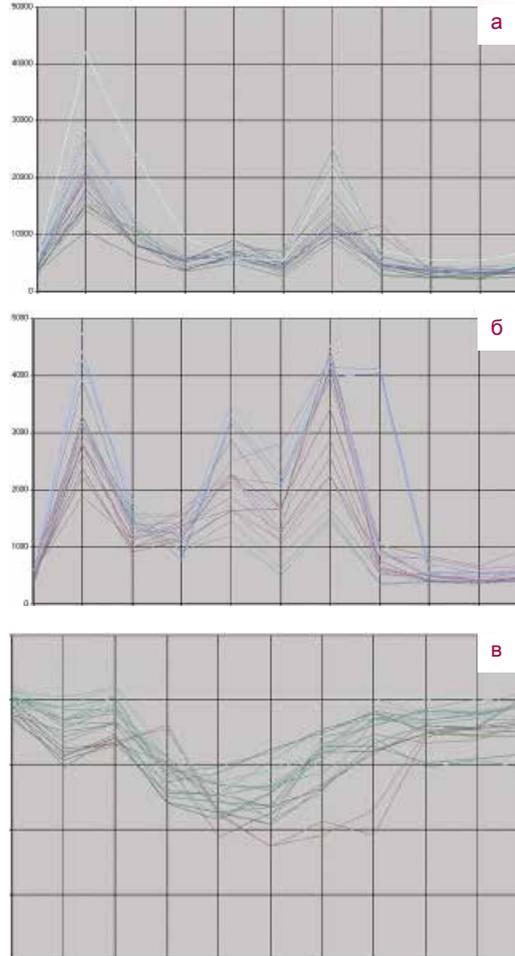


Рис. 9. Интенсивность рассеивания радарного сигнала посевам яровой пшеницы:
 а) Временной ряд интенсивности сигнала в поляризации VV;
 б) Временной ряд интенсивности сигнала в поляризации VH;
 в) Временной ряд «радарного NDVI»

- Возможно уверенное определение некоторых этапов агротехнологических работ на полях, таких, как уборка урожая.

Таким образом, потенциал для решения некоторых задач мониторинга сельскохозяйственных земель у снимков Sentinel-1, безусловно, имеется. Проведенное в компании «Совзонд» исследование является

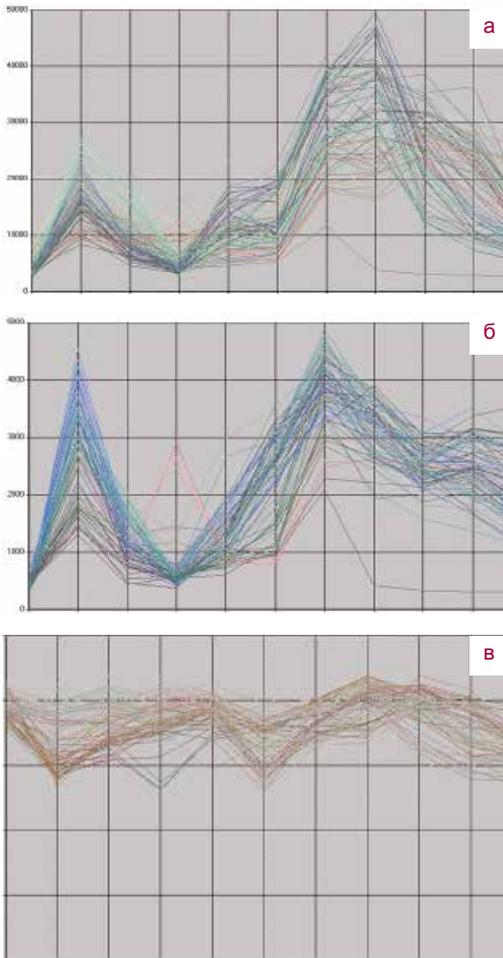


Рис. 10. Интенсивность рассеивания радарного сигнала посевами подсолнечника:

- а) Временной ряд интенсивности сигнала в поляризации VV;
 б) Временной ряд интенсивности сигнала в поляризации VH;
 в) Временной ряд «радарного NDVI»

одним из первых в России, описывающих возможности данных Sentinel-1 для решения задач сельского хозяйства. В ходе исследования были сформулированы новые задачи для дальнейших исследований. В то же время уже можно говорить об автоматизации отдельных процессов предварительной обработки данных ДЗЗ Sentinel-1 на базе

веб-сервиса компании «Совзонд» «Геоаналитика.Агро». Генерируемые продукты позволяют выполнить визуальное дешифрирование состава культур, визуально оценить степень увлажнения и проследить ход агротехнологических работ непосредственно в интерфейсе веб-сервиса.

22 апреля 2016 г. на орбиту был выведен второй спутник — Sentinel-1B. Ожидается, что с выводом на рабочую мощность второго спутника периодичность съемки сократится до 5 суток, что позволит получать еще большее количество снимков в течение вегетационного сезона, обеспечивая стабильность и надежность космического мониторинга.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Sentinel-1. ESA Sentinel online — electronic resource. Mode of access: <https://sentinel.esa.int/web/sentinel/missions/sentinel-1>
2. Agricultural Applications with SAR Data. Module 3202: Biosphere / Riedel T. Eckardt R.. — Earth Observation Institute of Geography, Friedrich-Schiller-University Jena / SAR Edu — remote sensing education initiative — electronic resource. Mode of access: <https://saredu.dlr.de/unit/agriculture>
3. Radar Remote Sensing for Earth and Planetary Science / J. J. van Zyl. Jet Propulsion Laboratory — electronic resource. Mode of access: http://www.its.caltech.edu/~ee157/lecture_note/Radar.pdf
4. Brisco B. Agricultural applications with radar/ B. Brisco, R. J. Brown. - Principles and applications of imaging radar. New York: Wiley, 1998, p. 381-406.
5. AgriSAR 2009. Technical Assistance for the Implementation of the AgriSAR 2009 Campaign / Final Report. Vol. 1 Executive Summary, Data Acquisition, Data Simulation / AgriSAR Team. — MDA Systems Ltd., 2011. — 590 p.
6. Sentinel-1 User Handbook. — Sentinel-1 Team, ESA, 2013. — 80 p.