

Радиолокационное зондирование для решения задач сельского хозяйства

Е.А. Балдина², П.В. Денисов¹, А.С. Мартьянов¹, К.А. Трошко^{1,2}

¹Научный центр оперативного мониторинга Земли (НЦ ОМЗ) АО «Российские космические системы», 127490, Москва, ул. Декабристов, владение 51, строение 25, E-mail: martyanov@ntsomz.ru

²Московский государственный университет имени М.В. Ломоносова, Географический факультет, 119991, Москва, Ленинские Горы, дом 1, E-mail: eabaldina@yahoo.com

Рассмотрены возможности и особенности использования данных современных радиолокационных съёмочных систем для сельского хозяйства. Выделены параметры радиолокационной съёмки, важные при наблюдении сельскохозяйственных угодий, и характеристики объектов, оказывающие влияние на особенности изображения. Систематизированы задачи сельскохозяйственного мониторинга, решаемые с использованием радиолокационных данных, оптимальные параметры съёмки для этих задач и космические радиолокационные системы, удовлетворяющие указанным требованиям.

The review of possibilities and peculiarities of radar data use for agriculture is represented. Parameters of radar data acquisition and objects features influencing the radar image are analyzed. Problems of agricultural monitoring which can be solved using radar data, appropriate radar imaging parameters and modern satellite radar systems satisfying these requirements are systemized.

Введение

Космическая съёмка является сравнительно мало затратным средством для получения пространственной информации с высокой частотой обновления. Эффективность применения данных спутниковой съёмки в оптическом диапазоне при решении задач сельского хозяйства была доказана уже более трех десятилетий назад. Однако этот вид съёмки имеет существенное ограничение, заключающееся в невозможности получения безоблачных снимков в течение всего сезона роста сельскохозяйственных культур, выдерживания необходимого интервала времени между съёмками. Радиолокационная съёмка позволяет получать изображения вне зависимости от облачности и освещенности земной поверхности. Чувствительность к диэлектрическим и геометрическим свойствам снимаемых объектов предоставляет дополнительную информацию, отсутствующую на снимках оптического диапазона. Активное развитие радиолокационных систем, появление новых типов радиолокационных данных, гораздо более слабое знакомство потенциальных потребителей с особенностями информации, содержащейся в радиолокационных изображениях, делают актуальным рассмотрение вопросов, посвященных применению этого вида данных для решения конкретных задач социально-экономического развития территорий, в частности, сельского хозяйства.

Радиолокационные данные имеют и свои недостатки. Это присутствие спекл-шума, геометрические искажения в районах с выраженным рельефом. Некоторые затруднения при интерпретации радиолокационных снимков вызывает влияние на них большого количества разносторонних факторов, действующих одновременно, что создает необходимость верификации методов и результатов обработки с опорой на дополнительные источники сведений о местности и, особенно, полевые подспутниковые обследования.

Обзор опыта применения радиолокационных данных для сельского хозяйства.

Возможности и особенности использования радиолокационных данных, в том числе для применения в сельском хозяйстве, представлены в обзорных и

образовательных материалах Канадского центра дистанционного зондирования [1], Германского аэрокосмического центра [2] и многих других. Известны примеры успешного применения радиолокационных данных в России для мониторинга сельскохозяйственных культур в течение всего вегетационного периода [3] и зерновых культур [4]. Если некоторое время назад применение радиолокационных данных сдерживала их высокая стоимость, то появление бесплатных общедоступных радиолокационных данных со спутника Sentinel-1A открывает новые возможности в решении практических задач на их основе.

В настоящее время радиолокационное зондирование Земли из космоса осуществляется в сантиметровых и дециметровых диапазонах длин волн: X, C, S и L (что примерно согласуется с длиной волны в 3, 5, 10 и 23 см соответственно). При зондировании Земли в радиодиапазоне все шире используется такое свойство электромагнитных волн, как поляризация: современные космические радиолокаторы осуществляют съёмку в одно-, двух- или четырёхполяризационном режимах (два последних варианта реализованы не во всех съёмочных системах).

В отличие от съёмки в оптическом диапазоне, радиолокационная съёмка ведётся не в надир, а со значительным отклонением от него: для большинства современных космических радиолокаторов диапазон углов съёмки варьируется от 20° до 60°. Эта особенность влияет на геометрические свойства радиолокационных изображений. Кроме того, возможность изменения угла съёмки позволяет повысить периодичность получения изображений одного и того же участка местности.

Отражательная способность различных объектов в радиодиапазоне характеризуется коэффициентом обратного рассеяния σ_0 , называемым также удельной эффективной площадью рассеяния (УЭПР). Он представляет собой отношение мощности сигнала, отражённого от объектов, к мощности сигнала, излучаемого радиолокатором. УЭПР при анализе радиолокационных изображений представляет собой аналог яркости на оптическом снимке.

Изображение сельскохозяйственных угодий на радиолокационных снимках зависит от большого числа факторов: как особенностей выполнения съёмки, так и свойств местности.

Под особенностями выполнения съёмки условимся понимать параметры съёмки, которые определяются техническими характеристиками радиолокационных систем: длина волны, поляризация, угол съёмки. Под свойствами местности здесь понимаются характеристики почвенного и растительного покрова сельскохозяйственных угодий. Эти факторы влияют на изображение объектов на радиолокационном снимке совместно.

Длина волны влияет в первую очередь на проникающую способность сигнала, то есть возможность получать информацию не только о поверхности объекта, но и его подповерхностных слоях, что имеет особое значение при изучении почвенно-растительного покрова. По мере увеличения длины волны проникающая способность возрастает. Кроме того, от длины волны зависит пространственное разрешение получаемых изображений: в коротковолновых диапазонах технически легче реализовать высокое разрешение (1 м и менее) [5].

Волны X диапазона отражаются только от верхних частей растений. Съёмка в этом диапазоне подходит для распознавания и оценки состояния таких зерновых культур, как овес, рожь, пшеница, ячмень, рис. Она может быть эффективна при классификации по различиям в УЭПР культур на начальной стадии вегетации. Оценить влажность почвы при наличии растительности на снимках в этом диапазоне невозможно [6].

Съёмка в C диапазоне пригодна для дешифрирования культур с невысокими стеблями: пшеницы, рапса, риса, многолетних трав. При съёмке в этом диапазоне

основной вклад в отраженный сигнал дают листья, их вклад может быть больше, чем стеблей (в отличие от данных в длинноволновых диапазонах). При зондировании в перекрёстной поляризации С диапазон хорошо подходит для разделения открытой почвы и растительности [7]. Съёмка в С диапазоне лучше других передает различия в УЭПР при распознавании разных способов обработки почвы и оценке качества уборки посевов.

Съёмка в L диапазоне подходит для дешифрирования культур с высокими стеблями и широкими листьями: кукурузы, подсолнечника, сорго [7]. Низкорослые травянистые культуры на снимках в этом диапазоне будут слабо различимы. Из всех диапазонов, используемых при космической радиолокационной съёмке в настоящее время, L диапазон наилучшим образом подходит для дешифрирования древесных насаждений.

Установлено, что использование данных, полученных одновременно в нескольких диапазонах длин волн, дает преимущество при классификации сельскохозяйственных культур и определении влажности почвы [8], однако такая съёмка из космоса в настоящее время не ведется.

Волны разной поляризации по-разному взаимодействуют с объектами местности в зависимости от их ориентации и структуры. На снимках, полученных в согласованной горизонтальной поляризации, сильно выражено влияние на изображение состояния почвенного покрова (такие параметры, как шероховатость и влажность). При съёмке в согласованной вертикальной поляризации на величину УЭПР сильно влияет эффект ориентации рядов относительно направления съёмки, полученные снимки полезны при определении вертикальной структуры растительности.

Снимки в перекрёстной поляризации характеризуют объемное рассеяние сигнала растительностью. На снимках в перекрёстной поляризации наблюдается максимальный контраст между открытой почвой и растительным покровом, при этом они почти совсем не отображают содержание влаги в почве [9]. Благодаря этим особенностям съёмка в перекрёстной поляризации наилучшим образом подходит для картографирования видов и состояния растительного покрова.

Данные, полученные в нескольких поляризациях, позволяют проводить поляриметрическую обработку, выделяя при этом различные механизмы рассеяния радиоволн от объектов местности. Использование радиолокационных данных в нескольких поляризациях повышает надежность классификации сельскохозяйственных культур, кроме того, поляриметрические данные используются в моделях определения влажности почв.

Боковой обзор влияет не только на геометрические характеристики радиолокационных изображений, но и на особенности взаимодействия с зондируемой поверхностью. Данные, полученные при съёмке на больших углах от вертикали ($>40^\circ$), обеспечивают лучшее различение сельскохозяйственных культур за счёт большего взаимодействия радиоволн с растительностью и меньшего – с почвой.

Данные, полученные при съёмке на малых углах ($<30^\circ$), могут быть использованы для определения влажности почвы, так как в этом случае уменьшается влияние на коэффициент обратного рассеяния растительного покрова [2].

Говоря в целом, можно выделить три вида взаимодействия радиоволн с поверхностью сельскохозяйственных угодий, называемых также механизмами рассеяния радиоволн [10] (рис.1):

1) объёмное рассеяние (рис. 1а) – обратное рассеяние непосредственно от частей растения, таких как листья, стебли, соцветия, включающее множественное отражение и возникающее в случае, если длина радиоволны соизмерима с размерами этих частей. При объёмном рассеянии в растительном покрове происходит увеличение УЭПР и

изменение поляризации сигнала. Именно последний фактор объясняет то, что объёмное рассеяние лучшим образом выявляется на радиолокационных изображениях в перекрёстной поляризации.

2) двукратное рассеяние – двойное отражение между поверхностью почвы или воды и растительностью с вертикальной структурой, которое характеризуется очень высокими значениями УЭПР (рис. 1б). Этот вид рассеяния характерен, например, для риса, растущего на поле, залитом водой.

3) однократное, или поверхностное, рассеяние (рис. 1в) – обратное рассеяние от поверхности почвы с небольшой шероховатостью, которое характеризуется низким значением УЭПР.

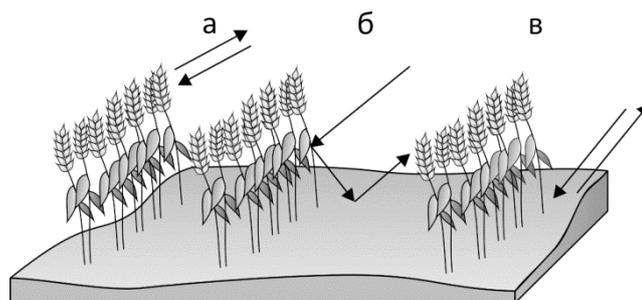


Рис. 1. Обратное рассеяние от поверхности сельскохозяйственных угодий: а – объёмное, б – двукратное, в – однократное

На радиолокационных изображениях в комплексе проявляются геометрические характеристики растительности, такие как форма, размер, ориентация листьев, стеблей, ветвей, их соотношение с длиной зондирующей волны. В совокупности они могут обеспечить дешифрирование вида сельскохозяйственной культуры. Они меняются в течение сезона индивидуально для основных групп культур, что также может служить дешифровочным признаком.

В общем случае, значение УЭПР прямо пропорционально объёму биомассы, особенно на снимках в перекрёстной поляризации. Установлено [5], что наибольшее отражение от растительности наблюдается в коротковолновых диапазонах, но при этом при достижении определённого уровня биомассы соответственный рост значения УЭПР прекращается, различия в объёме биомассы не выявляются. Стоит также заметить, что травянистая растительность более «прозрачна» для длинноволновых диапазонов, то есть она имеет более низкий уровень отражения и не вносит значительный вклад в увеличение значения УЭПР.

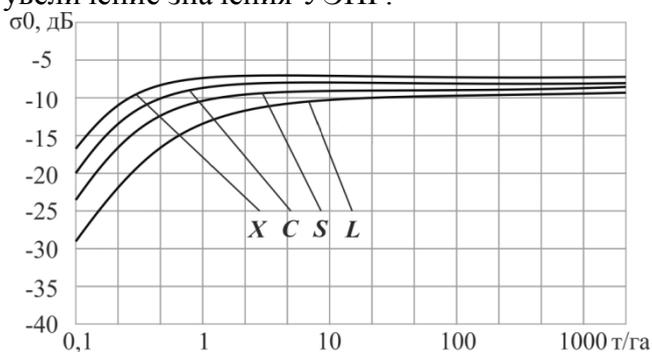


Рис. 2. Зависимость УЭПР в разных диапазонах длин волн от объёма биомассы

При съёмке, проводимой перпендикулярно направлению рядов посевов, наблюдается сильное увеличение значений их УЭПР, т.к. в этом случае возникает двукратное рассеяние. При отклонении от перпендикуляра всего на 5-15° различия в УЭПР могут достигать 5-10 дБ и даже 20 дБ. Этот эффект проявляется для пропашных

культур (кукуруза, картофель, хлопчатник) на изображениях в вертикальной поляризации.

Характер радиолокационного изображения зависит от шероховатости зондируемой поверхности, т.е. от размеров её неровностей, которые проявляются по-разному в зависимости от длины волны и угла падения излучения. В общем случае, по мере возрастания шероховатости поверхности происходит увеличение УЭПР.

Содержание влаги в частях растений и в почвах влияет на их диэлектрические свойства и, как результат, на величину УЭПР. Увеличение содержания влаги приводит к возрастанию УЭПР [11, 12].

Почвы различной влажности лучше различаются в длинноволновом диапазоне. Известен опыт [13] оценки влажности почв с использованием различных моделей (Oh, Dubois, IEM), использующих данные, полученные в разных поляризациях.

Результаты

На основе выполненного обзора и материалов [14] собраны рекомендации по выбору параметров радиолокационной съёмки для решения сельскохозяйственных задач различного уровня (таблица 1). Приведены действующие космические системы радиолокационного наблюдения Земли, отвечающие указанным требованиям. Кроме рассмотренных выше параметров съёмки (длина волны, поляризация, углы съёмки) и особенностей объектов, проявляющихся на радиолокационных изображениях, для систематизации сельскохозяйственных задач учтены охват, пространственное разрешение и сроки съёмки.

Под охватом подразумевается размер территории, который необходимо покрыть радиолокационными снимками для решения той или иной задачи. Крупнорегиональный охват (в таблице принято сокращение КР) подразумевает получение снимков на части материков и крупные регионы (например, юг Западной Сибири), что возможно только при создании мозаики из радиолокационных снимков, полученных в широкозахватном режиме (ScanSAR), где ширина полосы съёмки может достигать нескольких сотен километров. Региональный охват (Р) соответствует получению снимков на регионы и их части (например, Краснодарский край). В большинстве задач при этом необходимо высокое пространственное разрешение, что можно достичь при использовании маршрутного режима (StripMap) с полосой охвата в десятки километров и создании мозаик. Локальный охват (Л) означает получение снимков на небольшие участки местности, отдельные агропредприятия. При этом необходимо очень высокое пространственное разрешение, что доступно при съёмке в прожекторном режиме (SpotLight) с полосой захвата в единицы – первые десятки километров.

Пространственное разрешение радиолокационных снимков как минимум в два раза хуже снимков с аналогичным разрешением в оптическом диапазоне, что объясняется наличием различных искажений, наиболее существенное влияние из которых оказывает спекл-шум. При определении необходимого пространственного разрешения для различных задач использовались материалы [15]. На снимках среднего разрешения (в радиодиапазоне – 100-150 м) в районах равнинного земледелия неявно проявляется сетка полей. На снимках относительно высокого разрешения (15-50 м) хорошо видны поля, а в районах залесённых и с выраженным рельефом для их отображения требуется разрешение 5-15 м. Для выявления неоднородностей посевов нужны снимки с разрешением 0,5-5 м.

Срок съёмки – очень важный параметр при использовании космических снимков для решения сельскохозяйственных задач. В начале сельскохозяйственного сезона съёмка может быть проведена для мониторинга посевных работ. Оптимальным сроком

съёмки для распознавания видов сельскохозяйственных культур в умеренном поясе является середина сезона. Для мониторинга состояния сельскохозяйственных культур целесообразно проведение съёмок с учётом стадий их развития, для чего существуют специальные календари вегетационного развития культур [2]. Для прогнозирования урожая требуется проведение съёмок с высокой частотой; кроме того, требуется наличие эталонных участков с известной урожайностью и/или архив снимков и статистических данных по урожайности. Высокой повторяемости съёмок также требуют точное земледелие и контроль состояния посевов. В конце вегетационного периода съёмку можно проводить для оценки биомассы, мониторинга уборочных работ, характеристики качества уборки.

Апробация решения сельскохозяйственных задач.

Возможности практического применения спутниковых радиолокационных данных исследованы на примере оценки состояния заброшенных и обрабатываемых сельскохозяйственных земель в дельте Волги с использованием данных Radarsat-2 в рамках международной образовательной программы SOAR-EI (Science and Operational Applications Research Education International Initiative). В ходе работ с использованием программы Radarsat-2 Acquisition Planning Tool (MDA) на период с 4 июня по 15 августа 2014 г. была запланирована и осуществлена четырёхкратная съёмка дельты Волги. Съёмка проводилась с интервалом в 24 дня с идентичными параметрами (режим съёмки FQ30 (Fine QuadPol), поляризации HH, HV, VH, VV, угол падения 47,72 гр. в интерферометрическом режиме) для исключения влияния различных факторов, не связанных с изменениями местности. Данные были получены в поляриметрическом режиме, что позволило извлекать качественно новую информацию о рассеивающих характеристиках объектов. В сроки, совпадающие и близкие к срокам съёмки, проводились наземные обследования местности на базе Всероссийского научно-исследовательского института орошаемого овощеводства и бахчеводства (ВНИИОБ). Данные наземных обследований использовались для установления зависимостей между реальными характеристиками объектов местности и параметрами, вычисляемыми по космическим данным, а также для выполнения контролируемой классификации и оценки точности полученных результатов. Для обработки радиолокационных данных использовано программное обеспечение Sentinel-1 Toolbox и ENVI

Сопоставление результатов обработки с данными наземных обследований показало, что наиболее достоверный результат при распознавании состава сельскохозяйственных культур (томаты, картофель, рис, ячмень, люцерна) дает классификация по минимальному расстоянию. Автоматизированное распознавание большинства рассмотренных культур оказалось эффективно при классификации снимков, полученных в перекрестной поляризации, при проведении съёмок в конце июня и конце июля, поскольку именно в это время наиболее ярко проявляются различия в значении и динамике объёма биомассы у разных культур.

Для оценки состояния посевов оптимальной явилась неконтролируемая поляриметрическая классификация Freeman-Durden с настройками по умолчанию. Она позволила определить убранные или незасаженные участки (поверхностное рассеяние), посевы, где растения имеют большую биомассу (объемное рассеяние), и отдельно – посевы риса после трубкавания (двойное отражение).

Авторы признательны CSA и MDA за выполнение съёмки и предоставление данных Radarsat-2 в рамках проекта SOAR-EI №5137.

Таблица 1. Сельскохозяйственные задачи, решаемые с применением данных радиолокационного зондирования

Задача	Охват	Пространственное разрешение, м	Диапазон длин волн	Поляризация, основная и (альтернативная)	Угол падения, °	Сроки съемки	Современные съемочные системы
Экономические задачи регионального управления ресурсами							
Инвентаризация и картографирование сельскохозяйственных угодий	Р	10-50	комбинация С и L	HH+HV+VH+VV/ (HV/VH+VV)	>40	Начало, середина и конец вегетационного периода	Radarsat-2, RISAT-1, Sentinel-1A, ALOS-2/PALSAR-2
Мониторинг технологий обработки почвы	Р и Л	2-5	С	HH	>40	Посевные работы	Radarsat-2, RISAT-1, Sentinel-1A
Экономическая разведка для прогноза урожайности по зарубежным территориям	КР	50-100	Х, С, L в зависимости и от культуры	HV/VH	>40	Несколько съемок в течение вегетационного периода	TerraSAR-X, TanDEM-X, COSMO-SkyMed-1-4, Radarsat-2, RISAT-1, Sentinel-1A, ALOS-2/PALSAR-2
Задачи страхования посевов и урожая: определение ущерба от воздействия неблагоприятных факторов для оценки страховой суммы	Р	5-15	Х, С, L в зависимости и от культуры	HV/VH	>40	При необходимости	TerraSAR-X, TanDEM-X, COSMO-SkyMed-1-4, KOMPSAT-5, Radarsat-2, RISAT-1, Sentinel-1A, ALOS-2/PALSAR-2
Определение районов с урожайностью ниже средней. Оценка необходимости и эффективности мер поддержки	Р	5-15	Х, С, L в зависимости и от культуры	HV/VH	>40	Несколько съемок в течение вегетационного периода	TerraSAR-X, TanDEM-X, COSMO-SkyMed-1-4, KOMPSAT-5, Radarsat-2, RISAT-1, Sentinel-1A,

сельскохозяйственных предприятий							ALOS-2/PALSAR-2
Контроль достоверности сведений, подаваемых сельхозпроизводителям и (площадь посевов, типы культур, урожайность и др.)	Р и Л	2-5	Х, С, L в зависимости и от культуры	HH+HV+VH+VV/ (HV/VH+VV)	>40	Несколько съемок в течение вегетационного периода	TerraSAR-X, TanDEM-X, Radarsat-2, RISAT-1, Sentinel-1A ALOS-2/PALSAR-2
Научно-исследовательские мониторинговые задачи							
Определение влажности почв для расчета водного баланса сельскохозяйственных территорий	КР и Р	15-50	С, L или их комбинация	HH+HV/VH (VV+HV/VH)	<30	При необходимости	Radarsat-2, RISAT-1, Sentinel-1A ALOS-2/PALSAR-2
Оценка процессов деградации с/х земель	Р	2-5	С или комбинация С и L	HH+HV+VH+VV/ (HV/VH+VV)	>40	В середине вегетационного периода	Radarsat-2, RISAT-1, Sentinel-1A, ALOS-2/ PALSAR-2
Исследование систем земледелия	Р	2-5	С	HH+HV+VH+VV/ (HV/VH+VV)	>40	Начало, середина и конец вегетационного периода	Radarsat-2, RISAT-1, Sentinel-1A
Контроль технологического процесса на уровне сельскохозяйственных предприятий							
Создание схем сельскохозяйственных угодий	Л	≤1	Х, С	HV/VH/ (VV)	>40	Начало и середина вегетационного периода	TerraSAR-X, TanDEM-X, COSMO-SkyMed-1-4, KOMPSAT-5, Radarsat-2, RISAT-1
Определение типов посеянных культур, контроль севооборотов	Л	1-2	Х, С, L	HV/VH/ (VV)	>40	Начало, середина и конец вегетационного периода	TerraSAR-X, TanDEM-X, COSMO-SkyMed-1-4, KOMPSAT-5, Radarsat-2, RISAT-1, ALOS-2/PALSAR-2

Контроль состояния и развития посевов	Л	1-2	Х, С, L в зависимости и от культуры	HH+HV+VH+VV/ (HV/VH+VV)/ (VV+HH)	>40	Несколько съемок в течение вегетационного периода	TerraSAR-X, TanDEM-X, Radarsat-2, RISAT-1, ALOS-2/PALSAR-2
Определение влажности почв для оценки необходимости полива	Л	2-5	С, L или их комбинация	HH+HV/VH (VV+HV/VH)	<30	Несколько съемок в течение вегетационного периода	Radarsat-2, RISAT-1 ALOS-2/PALSAR-2
Оценка объема биомассы сельскохозяйственных культур	Л	1-2	Х, С, L в зависимости и от культуры	HV/VH/ (VV+HH)	>40	В конце вегетационного периода	TerraSAR-X, TanDEM-X, COSMO-SkyMed-1-4, KOMPSAT-5, Radarsat-2, RISAT-1, ALOS-2/PALSAR-2
Выявление и картографирование повреждений, нанесенных вредителями или погодными условиями (ветер, град)	Л	1-2	Х, С, L в зависимости и от культуры	HV/VH/ (VV)	>40	При необходимости	TerraSAR-X, TanDEM-X, COSMO-SkyMed-1-4, KOMPSAT-5, Radarsat-2, RISAT-1, ALOS-2/PALSAR-2
Прогнозирование урожая	Л	1-2	Х, С, L в зависимости и от культуры	HV/VH/ (VV)	>40	Несколько съемок в течение вегетационного периода	TerraSAR-X, TanDEM-X, COSMO-SkyMed-1-4, KOMPSAT-5, Radarsat-2, RISAT-1, ALOS-2/PALSAR-2
Точное земледелие: определение неоднородностей в пределах поля для дифференцированного внесения удобрений.	Л	≤1	Х, С в зависимости и от культуры	HV/VH/ (VV)	>40	Несколько съемок в течение вегетационного периода	TerraSAR-X, TanDEM-X, COSMO-SkyMed-1-4, KOMPSAT-5, Radarsat-2, RISAT-1,

Контроль проведения агротехнических мероприятий	Л	1-2	С	HV/VH+HH	>40	Во время проведения уборки	Radarsat-2, RISAT-1
Определение типа и количества растительных остатков после уборки	Л	1-2	С	HV/VH	>40	После уборки	Radarsat-2, RISAT-1

Литература

1. Educational Resources for Radar Remote Sensing // Canada Centre for Remote Sensing, Natural Resources Canada. URL: ftp://ftp.ccrs.nrcan.gc.ca/ad/MAS/globesar/eng/gsarcd_e.pdf (дата обращения: 15.05.2014)
2. Agricultural Applications with SAR Data // SAR-EDU remote sensing education initiative. URL: <https://saredu.dlr.de/unit/agriculture> (дата обращения: 01.03.2015)
3. Кантемиров Ю.И., Семёнов В.Н. Возможности спутникового радиолокационного мониторинга для решения задач сельского хозяйства // Геоматика. 2011, №2, с. 85-89.
4. Брыксин В.М., Евтюшкин А.В., Кочергин Г.А., Рычкова Н.В. Мониторинг зерновых культур на юге Западной Сибири по данным MODIS и ERS-2. // Материалы Международной научной конференции «Зондирование земных покровов радарными и радиометрами с синтезированной апертурой». – г. Улан-Удэ – п. Энхалук., 24-29 июня 2013 г., с. 79-81
5. Верба В.С., Неронский Л.Б., Осипов И.Г., Турук В.Э. Радиолокационные системы землеобзора космического базирования / под ред. В.С. Вербы. М.: Радиотехника, 2010. 680 с.
6. Fontanelli G., Paloscia S., Zribi M., Chahbi A. Sensitivity analysis of X band SAR to wheat and barley leaf area index in the Merguellig Basin // Remote Sensing Letters. 2013. Vol. 4(11). P. 1107-1116
7. Ferrazzoli P., Paloscia S., Pampaloni P., Schiavon G., Sigismondi S., Solimini D. The potential of multifrequency polarimetric SAR in assessing agricultural and arboreous biomass // IEEE Transactions on Geoscience and Remote Sensing. 1997. Vol. 35(1). P. 5-17
8. De Roo R. D., Du Y., Ulaby F. T., Dobson M. C. A semi-empirical backscattering model at L-band and C-band for a soybean canopy with soil moisture inversion // IEEE Transactions on Geoscience and Remote Sensing. 2001. Vol. 39(4). P. 864-872
9. Gherboudi I., Magagi R., Berg A. A., Toth B. Soil moisture retrieval over agricultural fields from multi-polarized and multi-angular RADARSAT-2 SAR data // Remote Sensing of Environment. 2011. Vol. 115. P. 33-43
10. Brisco, B, Brown, R.J. Agricultural Applications with Radar // Manual of Remote Sensing: Principles and Applications of Imaging Radar. 1998. Vol. 2. P. 381-406
11. Jensen J. Remote sensing of the Environment and Earth resource perspective. Prentice Hall, 2006. 608 p.
12. SAR-Guidebook // Sarmap SA. URL: <http://www.sarmap.ch/page.php?page=sarscape> (дата обращения: 01.09.2014)
13. Khabazan S., Motagh M., Hosseini M. Evaluation of Radar Backscattering Models IEM, OH, and Dubois using L and C-Bands SAR Data over different vegetation canopy covers and soil depths International // Archives of the Photogrammetry, Remote Sensing and Spatial Information Sciences, Volume XL-1/W3, 2013. – SMPR 2013, 5 – 8 October 2013, Tehran, Iran
14. Лабутина И.А., Январева Л. Ф. Использование аэро- и космических снимков для изучения сельского хозяйства // Аэрокосмические методы в социально экономической географии, под ред. Книжникова. М.: Изд-во МГУ, 1983. С.83-124
15. Книжников Ю.Ф., Кравцова В.И., Тутубалина О.В. Аэрокосмические методы географических исследований: учебник для студ. учреждений высш. проф. образования. М.: Академия, 2011. 416 с.