Возможность обнаружения гарей по разновременным радарным изображениям SENTINEL 1 для районов юга Сибири в сезон весна-лето 2015 г.

Н.В. Родионова

Фрязинский филиал Института радиотехники и электроники им. В.А. Котельникова РАН, Москва, 141190, Россия E-mail: rnv@ire.rssi.ru

В работе рассматривается возможность обнаружения гарей с помощью радарных изображений Sentinel 1 в весенний период (апрель) в Забайкалье и в летний период (август) в Бурятии. Гари обнаруживаются по экологическим изменениям в областях горения в послепожарный период. Показана сезонная зависимость изменений значений коэффициента обратного рассеяния и текстурных признаков в областях гарей в сравнении с областями, не подвергавшихся пожару. Показано, что метод RoM (ratio of means) способен выявить области гарей, в то время как неконтролируемая классификация, двойная поляризация, текстурная сегментация не позволили однозначно интерпретировать результаты классификации. Использование наряду с амплитудными значениями текстурных характеристик способно помочь идентифицировать области гарей. Показано, что гари можно обнаружить при совместном использовании изменений значений коэффициента обратного рассеяния и текстурного признака Харалика «контраст». Для весеннего периода (апрель) увели-чение коэффициента обратного рассеяния составило 4–5 дБ для поляризаций VV и VH и увеличение «контраста» в 2 ÷ 2,7 раза (VV поляризация) в исследуемом районе Забайкальского края. Для летнего периода (август) получено уменьшение коэффициента обратного рассеяния на 0,1-0,8 дБ и уменьшение «контраста» более чем в 2 раза в исследуемом районе Бурятии. Ни одним из рассмотренных методов не удалось обнаружить гари по разновременным радарным изображениям для горной области, когда горела тайга на очень крутых склонах. Дополнительной информацией служили космоснимки системы оперативного мониторинга СКАНЭКС, сервис "Космоснимки – Пожары".

Ключевые слова: дистанционное зондирование, радиолокационное изображение, поляризация, гари, отношение амплитуд разновременных изображений, текстурные признаки, неконтролируемая классификация

Одобрена к печати: 09.02.2016 DOI: 10.21046/2070-7401-2016-13-2-164-175

Введение

В настоящее время спутниковый мониторинг очагов пожаров включает в себя использование мультиспектральных данных, получаемых со спутников серии NOAA, TERRA, AQUA, SPOT2, SPOT4, PECУPC ДК, LANDSAT. Алгоритмы детектирования пожаров основаны на сильном излучении очагов горения в ИК диапазоне.

Ценность РСА (радар с синтезом апертуры) данных для картирования гарей показана в работах (Kasischke et al.,1992; Landry et al., 1995) и других, где продемонстрировано, что РСА обладают уникальными возможностями, которые могут дополнить и усилить оптикоэлектронные методы.

Взаимодействие радарного сигнала с земной поверхностью зависит от множества факторов, включая:

1) плотность материала поверхности и ее комплексную диэлектрическую постоянную *ε*;

2) шероховатость поверхности в сравнении с длиной волны;

3) вариации рельефа относительно величины угла обзора;

4) параметры сигнала радара (длина волны, поляризация, угол обзора).

Величину отраженного радарного сигнала характеризуют коэффициентом обратного рассеяния σ^0 . Более интенсивное обратное рассеяние происходит от поверхностей с большей ε , сильно зависящей от содержания влаги. В 1991 г. первые ERS радарные изображения Аляски показали, что области гарей на 3–6 дБ ярче окружающего не горевшего леса (Kasischke et al.,1992). Области гарей детектировались на основе экологических изменений леса, происходящих в послепожарный период. Эти изменения включают:

- 1) потерю кроны деревьев;
- 2) обнажение шероховатой поверхности;
- 3) увеличение влажности почвы (Kasischke et al., 1994).

Последнее (а именно – увеличение влажности почвы) зависит от сезона и происходит или ранней весной, или после дождя, или осенью при пополнении грунтовых вод. Данный фактор является доминирующим при увеличении обратного рассеяния горевшего леса (French et al., 1996), что связывают также и с оттаиванием замерзших слоев почвы. Однако в некоторых случаях наблюдается уменьшение влажности почвы после пожара (Swanson, 1996). Общее влияние пожара на влажность почвы зависит от мощности пожара, типа почвы и наличия вечной мерзлоты.

В середине апреля и в конце августа 2015 г. в ряде районов юга Восточной Сибири (Забайкальский край, Бурятия, Хакасия) наблюдались сильные лесные пожары. Для определения гарей по радарным данным необходима была РСА съемка на эти территории до и после пожара. Открытый доступ к данным Sentinel 1 (S1) С- диапазона с октября 2014 г. позволил найти необходимую информацию для некоторых районов Забайкалья и Бурятии. Это данные за 9 апреля (до пожара) и за 14 апреля (период горения) в Забайкалье, и данные за 24 июля (до пожара) и 22 августа (период горения) в Бурятии, которые и были взяты за основу.

Цель данной работы – попытаться обозначить области гарей с помощью методов поиска изменений (change detection) по радарным изображениям Sentinel 1 после пожаров в Забайкалье в апреле и в Бурятии в августе 2015 г.

Исследуемая область в Забайкалье, апрель 2015 г.

Исходные изображения (после калибровки и ко-регистрации) для района съемки в Забайкалье 9 и 14 апреля аппаратом S1 показаны на *рис. 1.* Использовались данные IW (interferometric wide swath) моды с поляризациями (VV+VH) и пространственным разрешением 20 м. Съемка в обоих сеансах осуществлялась на нисходящих витках. Для исследования была выбрана область в Забайкалье с Беклемишевской системой озер. На *рис. 2* показаны области пожаров (красные термоточки) 13 и 14 апреля на данную территорию по космоснимкам системы оперативного мониторинга СКАНЭКС, сервис "Космоснимки – Пожары" (http://fires.kosmosnimki.ru). Беклемишевская (или Ивано-Арахлейская) система озер раскинулась цепью вдоль северо-западного склона Яблонового хребта в 80 км от Читы. Исследуемый фрагмент (subset) изображения включает два крупных озера из этой системы: озеро Иргень и озеро Большой Ундугун. Территория, в основном, низкогорная с межгорными долинами, с высотой горных хребтов более 1000 м. Территория покрыта горно-таежным лесом. Климат в исследуемом районе резко континентальный, следует отметить наличие вечной мерзлоты. Земля глубоко промерзает в зимний период на 1–1,5 метра и медленно оттаивает. Архив погоды в Чите на 9 апреля: отсутствие дождя, максимальная температура $+1^{\circ}$ С, ночью температура -5° С. Архив погоды на 14 апреля: отсутствие дождя, максимальная ная температура $+20^{\circ}$ С.



Рис. 1. Амплитудные изображения: (а), (б) – VV-поляризация, (в), (г) – VH-поляризация за 9 и 14 апреля, соответственно



Рис. 2. Карты пожаров за 13 и 14 апреля

Предварительная обработка данных

Работа с изображениями S1 осуществлялась с помощью находящейся в открытом доступе программы S1Toolbox (https://sentinel.esa.int/web/sentinel/toolboxes/sentinel-1).

Предварительная подготовка данных для поиска изменений на разновременных радиолокационных изображениях (РЛИ) включала в себя следующие операции.

- 1. Выделение интересующего фрагмента (subset). Фрагмент сохраняется в формате BEAM-DIMAP (.dim), включающем в себя как амплитудные, так и изображения интенсивности для всех поляризаций и сохраняющем всю геоинформацию (угол обзора, координатную привязку и т.д.).
- 2. Радиометрическая калибровка.
- 3. Пространственное совмещение разновременных изображений.

Размер используемых в работе subset после совмещения составлял 4071×3231 пикселов. Для фрагмента за 9 апреля угол обзора менялся в пределах 39,752° – 42,078°, а для фрагмента за 14 апреля – 30,76° – 33,71°.

Методы поиска изменений для разновременных РСА данных

Поиск изменений (change detection – CD) на разновременных РЛИ одной и той же территории применяют в разных случаях, в основном связанных с причинением ущерба местности вследствие стихийных бедствий. Множество CD методов предложено в литературе для оптических изображений (Radke et al., 2005). Прямое применение этих методов к РЛИ ограничено из-за спекл-шума.

Среди популярных методов CD – разность изображений, отношение изображений, сравнение при классификации, метод главных компонент и многие другие.

Разность изображений – один из наиболее часто используемых методов CD. Для РЛИ главным недостатком этого метода является его чувствительность к спекл-шуму.

Метод отношения средних (ratio of means–RoM), в отличие от разности изображений, устойчив к спеклам. Помимо этого, RoM устойчив к ошибкам калибровки.

В данной работе для поиска изменений на РЛИ в результате пожаров использованы методы RoM, неконтролируемая классификация k-means, сегментация с использованием двух поляризаций и текстурная сегментация.

Поиск изменений по методу RoM разновременных изображений

Обратное рассеяние от поверхности для РСА сенсора в основном определяется диэлектрической проницаемостью и шероховатостью поверхности. Изменение этих параметров на разновременных снимках может служить фактором, по которому возможно определить области гарей. Не следует забывать о влиянии параметров съемки, метеоусловий, рельефа, типа леса, типа почв, вечной мерзлоты.

К амплитудным изображениям исследуемой области, показанным на *puc. 1*, был применен метод RoM, на *puc. 3* приведены результаты для VV и VH поляризаций. На изображении с VV поляризацией (*puc. 3*) выделились области с увеличенным коэффициентом обратного рассеяния в послепожарный период (светлый тон), для кросс-поляризации визуально изменения не столь очевидны. Увеличению обратного рассеяния 14 апреля могло способствовать подтаивание почвы при значительном увеличении температуры воздуха.

Известно также, что величина обратного рассеяния в условиях замерзания деревьев и почвы уменьшается (Ranson, Sun, 2000). Оценить изменения влажности в исследуемом районе можно с помощью дельта индекса (DI) (Thoma et al., 2008), который определяется как модуль разности значений коэффициента обратного рассеяния до и после пожара, нормированный на

значение коэффициента обратного рассеяния до пожара. Формула применима только для калиброванных и пространственно совмещенных изображений с согласованными поляризациями. Параметры съемки (угол обзора и т.д.), топография поверхности, тип почвы, вегетация, шероховатость поверхности в промежутке времени t2–t1 практически не должны меняться. Кроме того, до вычисления DI необходимо применить к изображениям фильтрацию спеклов. На *рис. 4* показано изображение DI для VV поляризации. Ярко выделились области с повышенным значением DI в правой части изображения (область гарей). Для сравнения рядом приведено изображение областей гарей за 20 апреля по данным СКАНЭКС.



Рис. 3. Результаты применения метода отношения средних значений амплитуд σ^0 изображения за 14 апреля к значениям за 9 апреля



Рис. 4. Delta index (слева) и карта гарей для 20 апреля (справа)

Для определения изменений в области гарей шероховатости поверхности использовались текстурные признаки (ТП) Харалика «контраст», «обратный момент» и «энтропия» (Haralick, 1973).

Для оценки количественных изменений значений σ^0 и ТП за промежуток времени от 9 до 14 апреля использовались вычисления значений этих параметров вдоль профилей в

областях гарей и вне их. На *рис.* 5 показаны графики значений σ^0 (VV и VH поляризации) и TП «контраст» (VV поляризация) вдоль одного из профилей в области гарей (верхний ряд, профиль между озерами) и одного из профилей вне области гарей (нижний ряд). Сплошной линией показаны графики за 9 апреля, пунктирной – за 14 апреля.



Рис. 5. Значения σ^0 и ТП «контраст» вдоль профилей в области гарей (верхний ряд) и вне области гарей (нижний ряд)

Для профилей в области гарей характерно значительное увеличение (на 4–5 дБ) среднего значения σ^0 после пожара как для VV, так и для VH поляризации. Для TП «контраст» (крайний правый ряд) также получено значительное увеличение значения (в 2,6 раза) для VV поляризации и несколько меньшее (в 1,8 раза) для VH поляризации. Для обратного момента изменения в сторону уменьшения незначительные, что можно интерпретировать как некоторое увеличение шероховатости. Значения энтропии несколько увеличились – интерпретируется как увеличение хаоса.

Для профиля вне области гарей (нижний ряд на *рис.* 5) характерны близкие значения σ^0 за 9 и 14 апреля. Значения ТП «контраст» (крайний правый ряд) уменьшились 14 апреля в сравнении с 9 апреля.

Обобщая результаты вычисления значений σ^0 и ТП по всем рассмотренным профилям, можно сделать такой вывод: для весеннего периода (апрель) на основе метода RoM показано увеличение значений σ^0 и ТП «контраст» в областях гарей в сравнении с областями вне гарей. Увеличение σ^0 вдоль профилей в областях гарей составляет от 4 до 5 дБ для обеих поляризаций, а для областей вне гарей – от 0,6 до 3,4 дБ. Использование наряду с амплитудными значениями текстурных характеристик способно помочь идентифицировать гари. Среднее значение «контраста» вдоль профилей в зоне гарей увеличилось от 2 до 2,7 раз (VV поляризация после фильтрации спеклов), тогда как вне области гарей есть как уменьшение контраста, так и увеличение в 1,4 раза. Для VH поляризации изменения контраста несколько меньше. Наиболее информативными с точки зрения наибольшего различия парамет-

ров до и после пожара являются значения σ^0 и текстурный признак Харалика «контраст». Именно эти два параметра желательно использовать при классификации с обучением.

Поиск изменений по альтернативным методам

Неконтролируемая классификация. К фрагментам РЛИ за 9 и 14 апреля после радиометрической калибровки и пространственного совмещения изображений был применен алгоритм неконтролируемой классификации k-means с числом кластеров 10 и числом итераций 14 на базе программы S1Toolbox. Результат для VV поляризации показан на *рис. 6*. Легенда для изображений одинаковая. Интерпретация затруднена.



Рис. 6. Неконтролируемая классификация разновременных изображений, VV поляризация (изображение за 9 апреля – слева, за 14 апреля – справа)

Поиск изменений по двухканальному изображению (две поляризации). Для каждого сеанса (9 и 14 апреля) построены RGB изображения с использованием двух поляризаций VV и VH в RGB кодировке: red –VV, green- VH, blue – VV/VH, результат показан на *puc.* 7.



Рис. 7. Двухканальная сегментация (две поляризации), 9 апреля – слева, 14 апреля – справа, red – VV, green – VH, blue – VV/VH

Использование двух поляризаций, несмотря на слабость сигнала VH поляризации в сравнении с сигналом VV поляризации, имеет преимущества, поскольку именно кроссполяризованный сигнал ответственен за объемное рассеяние, и снижение значения данного сигнала свидетельствует о потере кроны деревьев в областях горения леса.

Поиск изменений по текстурному изображению. Текстура, описываемая статистиками второго и более высоких порядков, является источником пространственной информации на РЛИ и помогает интерпретировать без априорной информации амплитудные изображения. Недостатком является сильная зависимость текстуры от фильтрации спеклов. ТП вычислялись на РЛИ в движущемся окне [5×5] пикселов при N=32, где N – число градаций уровней яркости, определяющее размер матрицы смежности. Значение «контраста» растет с ростом перепада яркости между соседними точками на изображении, поэтому можно ожидать увеличение значения «контраста» из-за двойного переотражения в областях с «мертвыми» деревьями, лишенными кроны вследствие пожара. Для «обратного момента» повышенное значение дают области с малым перепадом яркости. Энтропия имеет тем большее значение, чем больше хаоса.

На *рис.* 8 показаны текстурные изображения для двух дат с VV поляризацией в RGB кодировке: red – «контраст», green – «энтропия», blue – «обратный момент».



Рис. 8. Текстурная сегментация изображений VV поляризации для 9 апреля – слева и 14 апреля – справа

Текстурная сегментация позволяет интерпретировать изменения на изображениях, а именно, увеличение «контраста» (красный цвет) на изображении за 14 апреля скорее всего связано с увеличением эффектов двойного переотражения в областях с «мертвыми» деревьями, лишенными кроны вследствие пожара.

В целом рассмотренные альтернативные методы не позволяют идентифицировать области гарей, но помогают интерпретировать результаты метода RoM.

Пожары в Бурятии, август 2015 г.

Август 2015 г. выдался необычайно жарким в Бурятии. Горела тайга на западном и восточном берегах Байкала. Для определения возможности обнаружения гарей по радарным данным были выбраны изображения S1 на территорию восточного берега Байкала для

двух районов: первый – севернее дельты Селенги (район мыса Тонкого), и второй – полуостров Святой Нос.

Мыс Тонкий

На *рис. 9* показаны исходные изображения после ко-регистрации в сеансах за 24 июля (до пожара) и 22 августа (период горения). Имелись данные IW моды только для VV поляризации. Съемка в обоих сеансах осуществлялась на нисходящем витке. На *рис. 10* показана карта пожаров (Landsat) за 20 июля и 21 августа по космоснимкам системы оперативного мониторинга СКАНЭКС.



Рис. 9. Изображения после пространственного совмещения за 24 июля (слева) и 22 августа (справа)



Рис. 10. Карта пожаров за 20 июля и 21 августа по космоснимкам системы оперативного мониторинга СКАНЭКС

Отношение амплитуд σ^0 двух изображений и карта DI показаны на *рис. 11*. Области гарей выделились на изображении RoM светлым тоном (*рис. 11*, слева, области выделены овалами красного цвета) с уменьшенным значением σ^0 после пожара. На карте DI (*рис. 11*, справа) эти области имеют ярко-зеленый цвет – здесь значения DI после пожара меньше значений DI до пожара. Ситуация противоположна весенней, когда и σ^0 и DI увеличились после пожара.



Рис. 11. Отношение значений амплитуд σ^0 (слева); дельта индекс (справа): red – DI >0, green – DI<0, blue – DI =0

Количественные изменения значений σ^0 , вычисленные по профилям внутри и вне областей гарей, незначительны и показывают уменьшение σ^0 в области гарей для трех профилей от 0,1 до 0,8 дБ. Для «контраста» изменения более значительны – в области гарей «контраст» уменьшился более чем в 2 раза, вне области гарей – практически не меняется для двух дат. Таким образом, совместное использование амплитудной и текстурной информации позволяет выделить области гарей по двум разновременным изображениям.

Полуостров Святой Нос

Полуостров Святой Нос является отрогом Баргузинского хребта. Западные склоны густо поросли тайгой. Начало августа было жарким и сухим. Пожары начались в конце июля из-за грозы в горах. Низовые пожары быстро превращались в верховые. Горела тайга на очень крутых скалистых склонах. На *рис. 12* показана карта пожаров за 20 июля (а) и 21 августа (б) по космоснимкам системы оперативного мониторинга СКАНЭКС, а также RoM амплитуд σ^0 двух изображений (в).



Рис. 12. Карта пожаров за 20 июля (а) и 21 августа (б) по космоснимкам системы оперативного мониторинга СКАНЭКС, Landsat и изображение RoM амплитуд σ^0 (в)

Проведенный анализ изображений RoM, DI, значений σ^0 и TП «контраст» вдоль профилей, анализ изображений после неконтролируемой классификации и текстурной сегментации не позволили обнаружить области гарей на крутых горных склонах.

Заключение

В данной работе показана возможность обнаружения гарей по радарным изображениям Sentinel 1 на территории Забайкальского края и Бурятии в весенний и летний периоды 2015 г. Показана сезонная зависимость изменений значений коэффициента обратного рассеяния и текстурных признаков в областях гарей в сравнении с областями не подвергавшихся пожару. Для весеннего периода (апрель) увеличение σ^0 составляет 4-5 дБ для обеих поляризаций и увеличение «контраста» в 2 ÷ 2,7 раза (VV поляризация) в исследуемом районе Забайкальского края. Для летнего периода (август) получено vменьшение σ^0 на 0,1–0,8 дБ и уменьшение «контраста» более чем в 2 раза в исследуемом районе Бурятии.

Показано, что метод RoM способен выявить области гарей, в то время как неконтролируемая классификация, двойная поляризация, текстурная сегментация не позволили однозначно интерпретировать результаты классификации.

Использование наряду с амплитудными значениями текстурных характеристик способно помочь идентифицировать области гарей.

Ни одним из рассмотренных методов не удалось обнаружить гари по разновременным радарным изображениям для горной области, когда горела тайга на очень крутых склонах.

Литература

- 3. http://fires.kosmosnimki.ru.
- 4.
- https://mres.kosmosnimki.ru. https://sentinel.esa.int/web/sentinel/toolboxes/sentinel-1. *Kasischke E.S., Bourgeau-Chavez L.L., French N.H.F., Harrell P.A., Christensen N.L.* Initial observations on using SAR to monitor wildfire scars in boreal forests // Intern. J. Rem. Sens. 1992. Vol. 13. No.18. P. 3495–3501. *Kasischke E.S., Bourgeau-Chavez L.L., French N.H.F.* Observations in ERS-1 SAR image intensity associated with forest fires in Alaska // IEEE Trans. GRS. 1994. Vol. 32. No.1. P. 206–210. *Landry R., Ahern F.J., O'Neil R.* Forest burn visibility on C-HH radar images // Canadian J. Rem. Sens. 1995. Vol. 21. No. 2. P. 204. 206 5. 6.
- 7. Vol. 21. No. 2. P. 204-206.
- *Radke R. J., Andra S., Al-Kofahi O., Roysam B.* Image change detection algorithms: a systematic survey // IEEE Trans. on Image Processing. 2005. Vol. 14. No. 3. P. 294–307. doi:10.1109/TIP.2004.838698. 8.
- Prans. on Image Processing. 2005. Vol. 14, No. 5. P. 294–307. doi:10.1107/11F.2004.636076.
 Ranson K.J., G.Sun. Effects of environmental conditions on boreal forest classification and biomass estimates with SAR // IEEE Trans. GRS. 2000. Vol. 38. No. 3. P. 12421–252.
 Swanson D. K. Susceptibility of permafrost soils to deep thaw after forest fires in interior Alaska. USA and some ecologic implications // Arctic Alpine Research. 1996. P. 217–227.
 Thoma D.P., Moran M.S., Bryant R., Rahman M., Holifield-Collins C.D., Keefer T.O., Noriega R., Osman I., Skirvin S. M. T. H. M. C. D. Sterke P. L. Peters Liderd C.D. Apprentiate scale of soil moisture retrieval from
- S. M., Tischler M.A., Bosch D.D., Starks P.J., Peters-Lidard C.D. Appropriate scale of soil moisture retrieval from high resolution radar imagery for bare and minimally vegetated soils// Remote Sensing of Environment. 2008. Vol. 112. No. 2. P. 403-414.

^{1.} French N.H.F., Kasischke E.S., Bourgeau-Chavez L.L., Harrell P.A. Sensitivity of ERS-1 SAR to variations in soil water in re-disturbed boreal forest ecosystems // Intern. J. of Rem. Sens. 1996. Vol. 17. No. 15. P. 3037–3053.

Haralick R.M. Textural Features for Image Classification // IEEE. Trans. Syst. Man and Cybernetics. 1973. No. 6. 2. P. 610-621.

Evaluation of Sentinel 1 imagery for burned area detection in southern Siberia in spring and summer 2015

N.V. Rodionova

V.A. Kotelnikov Institute of Radioengineering and Electronics RAS Fryazino, Moscow Region 141190, Russia *E-mail: rnv@ire.rssi.ru*

The paper examines the possibility of burned area detection by Sentinel 1 radar images in Zabaikalsky Kraj in April and Buryatia in August 2015. Burned areas were found due to environmental changes in the areas of fire burning. Seasonal variations of backscatter coefficient and texture features in burned areas were shown in comparison to areas not exposed to fire. Burned area can be detected by joint analysis of changes in backscatter coefficient and Haralick's 'contrast' texture feature. It was shown that the RoM method (ratio of means) was useful in identifying areas after fire, while uncontrolled classification, dual polarization, and texture segmentation could not unambiguously interpret the classification results. For the spring period (April) in Zabaikalsky Kraj, an increase of the backscattering coefficient to 4-5 dB for VV and VH polarizations as well as 'contrast' rise by $2 \div 2.7$ times (VV polarization) were established compared to the period before the fires. For the summer period (August) in Buryatia, a decrease of the backscattering coefficient to 0.1–0.8 dB and 'contrast' fall by more than 2 times were obtained. None of the considered methods could locate burned areas from multi-temporal radar images of a mountainous area, when taiga burnt on very steep slopes. Satellite imagery of Kosmosnimki - Fires operational monitoring system served as additional information.

Keywords: remote sensing, SAR imagery, burned area, polarization, RoM, textural features, K-means classification

Accepted: 09.02.2016 DOI: 10.21046/2070-7401-2016-13-2-164-175

References

- 1. French N.H.F., Kasischke E.S., Bourgeau-Chavez L.L., Harrell P.A., Sensitivity of ERS-1 SAR to variations in soil water in re-disturbed boreal forest ecosystems, *Intern. J. of Rem. Sens.*, 1996, Vol. 17, No. 15, pp. 3037–3053.
- Haralick R.M., Textural Features for Image Classification, IEEE Trans. Syst. Man and Cybernetics, 1973, Vol. 3, 2. No. 6, pp. 610–621.
- http://fires.kosmosnimki.ru. 3
- https://sentinel.esa.int/web/sentinel/toolboxes/sentinel-1. 4.
- Kasischke E.S., Bourgeau-Chavez L.L., French N.H.F., Harrell P.A., and Christensen N.L., Initial observations on 5. using SAR to monitor wildfire scars in boreal forests, Intern. J. Rem. Sens., 1992, Vol. 13, No. 18, pp. 3495–3501. 6
- Kasischke E.S., Bourgeau-Chavez L.L., French N.H.F., Observations in ERS-1 SAR image intensity associated with forest fires in Alaska, *IEEE Trans. GRS*, 1994, Vol. 32, No. 1, pp. 206–210.
- Landry R., Ahern F.J., O'Neil R., Forest burn visibility on C-HH radar images, Canadian J. Rem. Sens., 1995, 7. Vol. 21, No. 2, pp. 204–206.
- Radke R. J., Andra S., Al-Kofahi O., Roysam B., Image change detection algorithms: a systematic survey, IEEE 8. Trans. on Image Processing, 2005, Vol. 14, No. 3, pp. 294-307.
- Ranson K.J. and Sun G., Effects of environmental conditions on boreal forest classification and biomass estimates 9. with SAR, IEEE Trans. GRS, 2000, Vol. 38, No. 3, pp. 1242-1252.
- 10. Swanson D. K., Susceptibility of permafrost soils to deep thaw after forest fires in interior Alaska. USA and some
- ecologic implications, *Arctic Alpine Research*, 1996, pp. 217–227.
 11. Thoma D.P., Moran M.S., Bryant R., Rahman M., Holifield-Collins C.D., Keefer T.O., Noriega R., Osman I., Skirvin S. M., Tischler M.A., Bosch D.D., Starks P.J., Peters-Lidard C.D., Appropriate scale of soil moisture retrieval from high resolution radar imagery for bare and minimally vegetated soils, Remote Sensing of Environment, 2008, Vol. 112, No. 2, pp. 403-414.