

ТЕМАТИЧЕСКИЙ АНАЛИЗ ИЗОБРАЖЕНИЙ SENTINEL 1 ДЛЯ РАЙОНА ЗАБАЙКАЛЬЯ В СЕЗОН ВЕСНА 2015

Родионова Н.В.

Институт радиотехники и электроники им. В.А. Котельникова РАН,
Фрязино, Московская область.

В данной работе рассматривается возможность дистанционного мониторинга пожаров в Забайкалье в весенний период 2015 года (апрель) с помощью радарных изображений Sentinel 1. Очаги пожаров обнаруживаются из-за экологических изменений в областях горения в после пожарный период. Дополнительной информацией служили космоснимки системы оперативного мониторинга СКАНЭКС, сервис “Космоснимки- Пожары”.

Введение. В настоящее время спутниковый мониторинг очагов пожаров включает в себя, в основном, использование мультиспектральных данных с разными пространственными разрешениями (ПР), получаемых со спутников серии NOAA, TERRA, AQUA, SPOT2, SPOT4, PERSYCS ДК, LANDSAT. Алгоритмы детектирования пожаров основаны здесь на сильном излучении очагов горения в ИК диапазоне.

Ценность РСА (радар с синтезом апертуры) данных для картирования очагов пожаров показана в работах [1, 2] и других, где продемонстрировано, что РСА обладают уникальными возможностями, которые могут дополнить и усилить опико-электронные 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) поляризацию сигнала. 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. Так, в [3] для величины ϵ сухого растительного материала приводятся значения $(1,5 < \epsilon' < 2; \epsilon'' \leq 0,1)$, а для влажного растительного покрова – значения существенно выше $(60 < \epsilon' < 80; 20 < \epsilon'' < 50)$ – для X- и P- диапазонов, соответственно.

В 1991 году первые ERS радарные изображения Аляски показали, что очаги лесных пожаров на 3-6 дБ ярче окружающего не горевшего леса [1]. Области пожаров детектировались на основе экологических изменений леса, происходящих в после пожарный период. Эти изменения включают: 1) потерю кроны деревьев, 2) обнажение шероховатой поверхности и 3) увеличение влажности почвы [4]. 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 [5], что связывают, в том числе, и с оттаиванием замерзших слоев почвы. Известно, что температура на поверхности почвы при пожаре может превышать 900°C , а температура в 200°C и выше является обычной при горении. Однако, в некоторых случаях наблюдается уменьшение влажности почвы после пожара [6]. Общее влияние пожара на влажность почвы зависит от мощности пожара, типа почвы и наличия вечной мерзлоты.

В середине апреля 2015 года в ряде районов юга Восточной Сибири (Забайкальский край, Бурятия, Хакасия) наблюдались сильные лесные пожары. Для определения областей горения по радарным данным необходима была РСА съемка на данные территории до и после пожа-

ра. Открытый доступ к данным Sentinel 1 (S1) с октября 2014 года позволил найти необходимую информацию для некоторых районов Забайкалья и Бурятии. Это данные за 9 апреля (до пожара) и за 14 апреля (период горения), которые и были взяты за основу.

Цель данной работы – попытаться обозначить области горения с помощью методов поиска изменений (change detection) по радарным изображениям Sentinel 1 после пожара в Забайкалье в апреле 2015 года.

Краткие сведения о Sentinel-1. Первый из группировки спутников Европейского Космического Агенства (ESA) Sentinel 1 С- диапазона длин волн был запущен в апреле 2014 года. Аппарат имеет полярную орбиту с частотой повторения съемки - 6 дней.

S1 имеет четыре стандартные операционные моды [7]:

- Strip map - ширина полосы 80 км и пространственное разрешение (ПР) 5*5 м,
- IW –interferometric wide swath – 250 км ширина полосы и 5*20 м ПР,
- Extra-wide swath (EW)- ширина полосы 400 км и 25*100 м ПР (3 looks),
- Wave мода, 5*20 м ПР.

Данные S1 (кроме Strip map моды) находятся в открытом доступе практически в реальном времени. S1 имеет на выбор VV или HH поляризации для Wave моды и (VV+VH) или (HH+HV) поляризации для всех остальных мод.

Исследуемая область. Районы съемок в Забайкалье 9 и 14 апреля аппаратом S1 показаны на рис. 1. Использовались данные IW моды с поляризациями (VV+VH). Каждый из файлов имеет размер порядка 1 Гб. Съемка в обоих сеансах осуществлялась на нисходящем витке. Для исследования была выбрана область в Забайкалье с Беклемишевской системой озер. На рис. 2 показаны области пожаров (выделены красным цветом) 13 и 14 апреля на данную территорию по космоснимкам системы оперативного мониторинга СКАНЭКС, сервис “Космоснимки- Пожары” [8]. Следует отметить, что по данным [8] до 13 апреля в 2015 году пожаров в данной области не было зафиксировано.

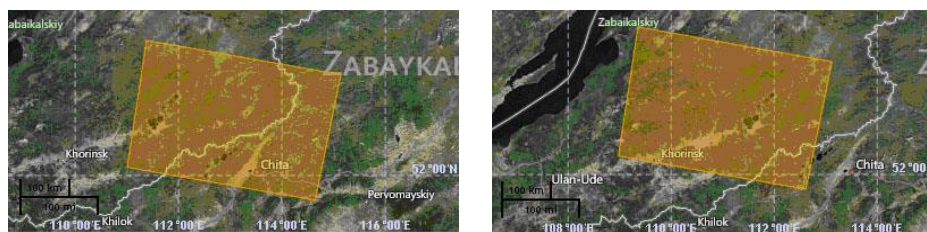


Рис. 1. Районы съемок аппаратом S1 9 и 14 апреля, соответственно.

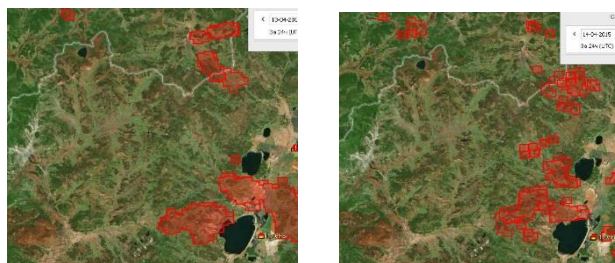


Рис. 2. Карта пожаров за 13 и 14 апреля [8]. В нижнем правом углу – озеро Иргень, справа от озера - село Иргень, выше – оз. Большой Ундугун.

Беклемишевская (или Ивано-Арахлейская) система озер раскинулась цепью вдоль северо-западного склона Яблонового хребта в 80 км от Читы. Исследуемый фрагмент (subset) изоб-

ражения включает два крупных озера из этой системы: озеро Иргень и озеро Большой Ундугун. Озеро Иргень проточное, зимой замерзает. Справа от озера расположено одноименное село. Территория, в основном, низкогорная с межгорными долинами, с высотой горных хребтов более 1000 м, покрыта горно-таежным лесом с преобладанием сосны, лиственницы, кедра и березы. Фрагменты карт территорий Хилокского и Беклемишевского лесничеств (2007 г.) и легенда к ним по данным [9] показаны на рис. 3.

Климат в исследуемом районе резкоконтинентальный. Характерная особенность климата – небольшое количество выпадающих осадков, холодная и продолжительная зима при почти полном отсутствии снега. Характерным явлением следует отметить наличие вечной мерзлоты, сильное иссушение почв зимой с последующим очень засушливым.

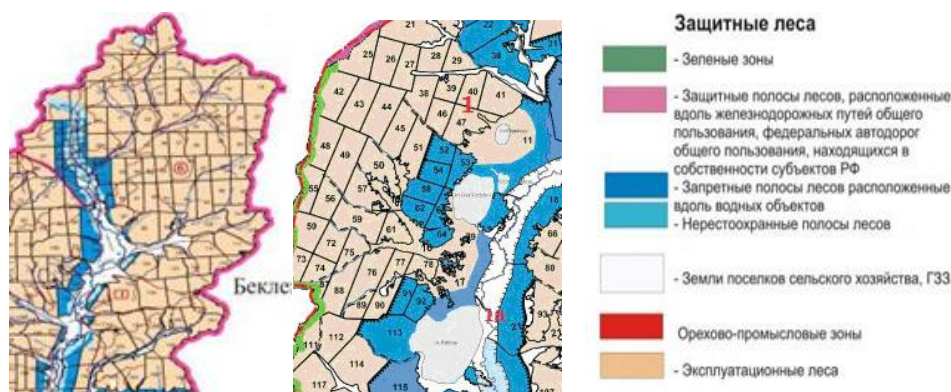


Рис. 3. Фрагменты карт территорий Хилокского (слева) и Беклемишевского лесничеств (2007 г.) и легенда к ним по данным [9].

весенним периодом. Почвы горно-таежные. 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 $+1^{\circ}\text{C}$, ночью температура -5°C . Архив погоды на 14 апреля: отсутствие дождя, максимальная температура $+20^{\circ}\text{C}$.

Предварительная обработка данных. Работа с изображениями S1 осуществлялась с помощью находящейся в открытом доступе программы S1Tbx [10].

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 поляризации и сохраняющем всю геоинформацию (угол обзора, координатную привязку и т.д.),
2. Радиометрическая калибровка - требуется для соответствия значений в пикселах величине обратного рассеяния от поверхности,
3. Корегистрация разновременных изображений.

Размер используемых в работе subset после корегистрации составлял 4071×3231 пикселей. Для фрагмента за 9 апреля угол обзора менялся в пределах $39^{\circ}.752 - 42^{\circ}.078$, и для фрагмента за 14 апреля – $30^{\circ}.76 - 33^{\circ}.71$, т.е. разница в угле обзора для фрагментов составляла около 9° .

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 территории вследствие стихийных

бедствий. Множество CD методов предложено в литературе для оптических изображений [11]. 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. Преимущество метода – его простота. Недостаток - необходимость поиска порога для обнаружения изменений. Для РЛИ главным недостатком 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. Множество проблем, связанных с взаимодействием радиоволн с лесным покровом, подстилающей поверхностью и почвами рассмотрено в [12]. Обратное рассеяние от поверхности для РСА сенсора в основном определяется влажностью и шероховатостью поверхности. Изменение этих параметров на разновременных снимках может служить фактором, по которому возможно определить очаги горения. Не следует забывать о влиянии параметров съемки, метеоусловий, рельефа, типа леса, типа почв, вечной мерзлоты. Учет множества факторов, влияющих на значение обратного рассеяния от поверхности, сильно затрудняют интерпретацию результатов поиска изменений.

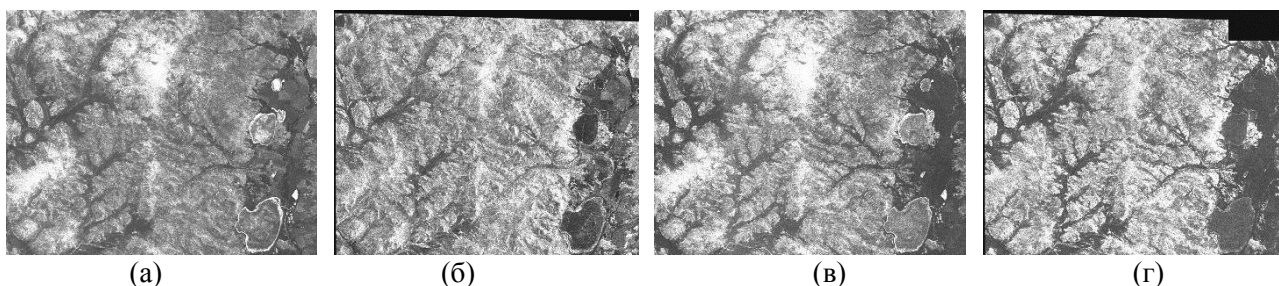


Рис. 4. Амплитудные изображения: (а), (б)-VV-поляризация, (в), (г)- VH-поляризация за 9 и 14 апреля, соответственно.

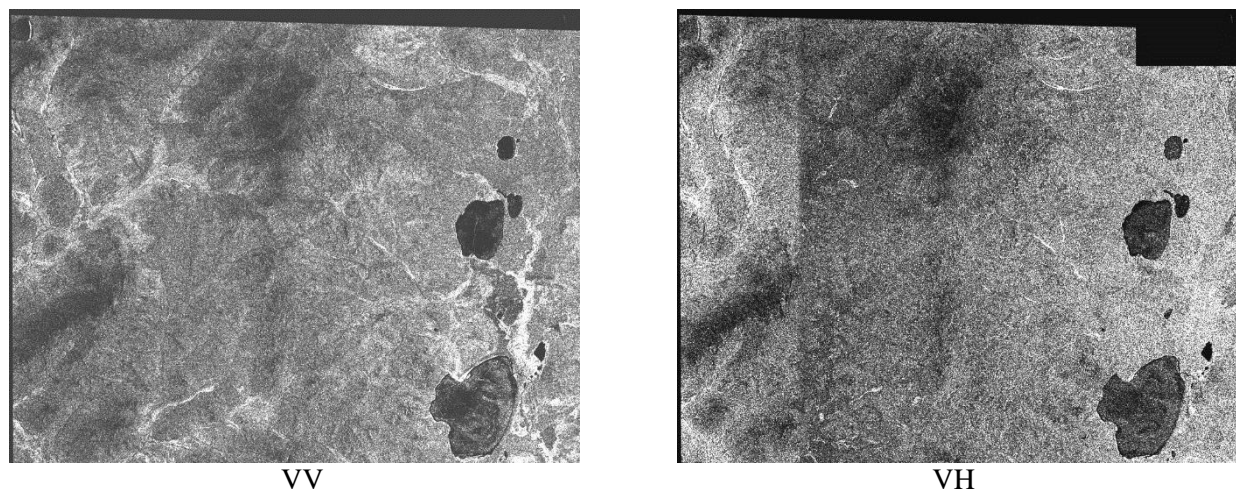


Рис.5. Результат отношения амплитуд изображения за 14 апреля к изображению за 9 апреля.

К амплитудным изображениям исследуемой области, показанным на рис. 4, был применен метод RoM, и на рис. 5 приведены результаты его применения для VV и VH поляризаций.

По изображениям на рис. 5 можно отметить следующее:

1) Выделились области с повышенным коэффициентом обратного рассеяния на изображении с VV поляризацией. Для кросс-поляризации яркость изображения лишь незначительно отличается в областях горения по сравнению с областями с отсутствием пожара.

2) Для VV поляризации выделился район между озерами с увеличенным обратным рассеянием 14 апреля, что соответствует области пожара по данным космоснимков СКАНЭКС (рис.2). Кроме того, справа от озер выделилась полоса со значительным увеличением обратного рассеяния. Эта полоса повторяет контуры границы между поселковыми землями и лесом (рис. 3). Известно [3], что на РЛИ при переходе от поверхности с малым коэффициентом обратного отражения к местности с большим значением коэффициента обратного отражения (например, при переходе от с/х поля к лесу, дороги к лесопосадке и т.д.) наблюдается область (полоса) сильного обратного рассеяния. Появление такой полосы объясняется эффектом уголкового отражения. Увеличению обратного рассеяния от почвы 14 апреля могло способствовать подтаивание почвы при значительном увеличении температуры. Кроме того, известно, что величины обратного рассеяния в условиях замерзания деревьев и почвы уменьшаются [13].

Для получения более детальной (количественной) информации об изменении коэффициента обратного рассеяния в одной из областей с повышенной σ^0 (рис. 5 для VV поляризации), в области между озерами (красная линия на рис. 6а) был рассмотрен профиль изменения значений σ^0 (рис. 6 б), а также профили значений текстурных признаков Харалика [14]: контраста (рис. 7), обратного момента и энтропии (синим цветом показаны графики за 9 апреля, малиновым – за 14 апреля).

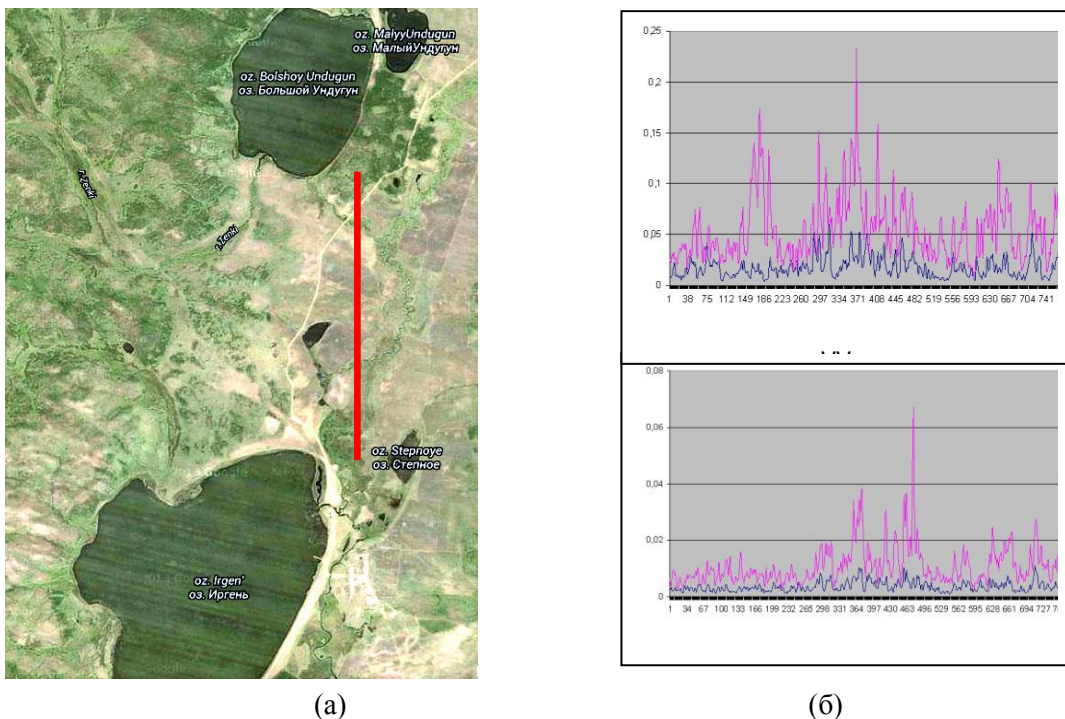


Рис. 6. Профили значений σ^0 вдоль красной линии (а) для VV и VH поляризаций (б) (синий цвет – 9 апреля, малиновый -14 апреля).

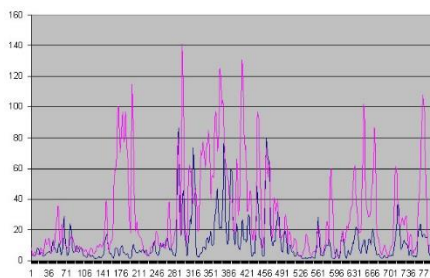


Рис. 7. Профиль значений ТП контраст для VV поляризации.

По рис. 6 отметим следующее: 1) Значения σ^0 на VV поляризации за 14 апреля (mean $\sigma^0 = 0.055$, СКО=0.03) значительно (в среднем в 3 раза) превышают значения σ^0 за 9 апреля (mean $\sigma^0 = 0.018$, СКО=0.01), причем это увеличение наиболее ярко выражено для лесных массивов (увеличение порядка в 5 раз), 2) значения σ^0 на VH поляризации значительно меньше (в среднем в 5 раз), чем на VV поляризации, а, именно, среднее значение σ^0 равно 0.0036 (СКО=0.0017) для 9 апреля и 0.011 (СКО=0.007) для 14 апреля. В районах леса значения σ^0 также значительно увеличились, 3) профиль графика изменений σ^0 для VV поляризации, особенно для 14 апреля, повторяет поверхность, а именно, в областях леса значения σ^0 увеличиваются.

Что касается профиля значений ТП (показан только для контраста на рис.7), то значения контраста увеличились 14 апреля, а, именно, среднее значение контраста для 9 апреля равно 11.7 (СКО=13), а для 14 апреля 30.3 (СКО=28.7). Наиболее существенное увеличение контраста за 14 апреля определяется в лесных областях, что коррелирует с увеличением σ^0 в этих районах. Увеличение энтропии 14 апреля не столь существенное, а, именно, среднее значение энтропии для 9 апреля равно 83 (СКО=9), а для 14 апреля 88 (СКО=7). Для обратного момента имеет место некоторое уменьшение среднего значения за 14 апреля (mean=47.5, СКО= 7.3), в сравнении с 9 апреля (mean=53.6, СКО=7.9), что говорит о небольшом увеличении шероховатости 14 апреля.

Поиск изменений на основе неконтролируемой классификации. К фрагментам РЛИ 9 и 14 апреля после радиометрической калибровки и корегистрации изображений был применен алгоритм неконтролируемой классификации k-means с числом кластеров-10 и числом итераций -14 на базе программы S1Tbx. Результат для VV- и VH- поляризаций показан на рис. 8. Каждое из изображений одноканальное, т.е. используется только одна поляризация. Легенда для всех изображений одинаковая.

Использовать результаты неконтролируемой классификации для поиска изменений на разновременных изображениях сложно, если не сказать невозможно.

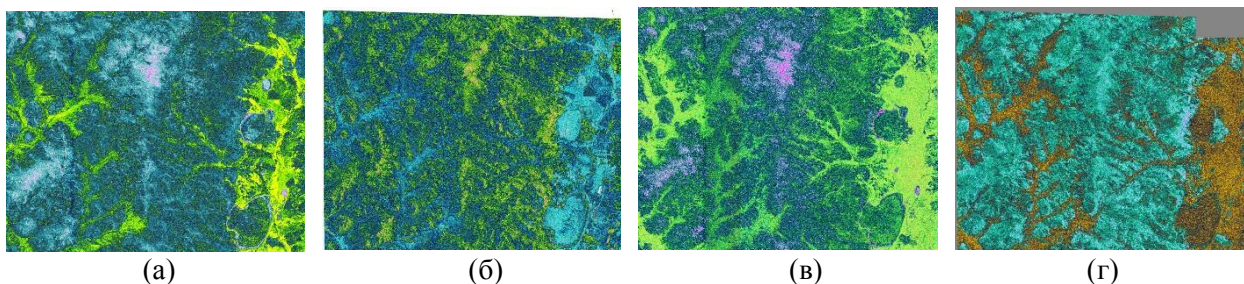


Рис. 8. Неконтролируемая классификация разновременных изображений. VV поляризация (а) и (б), VH поляризация (в) и (г), за 9 и 14 апреля, соответственно.

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 рис. 9 (а) для 9 апреля и рис. 9 (б) для 14 апреля.

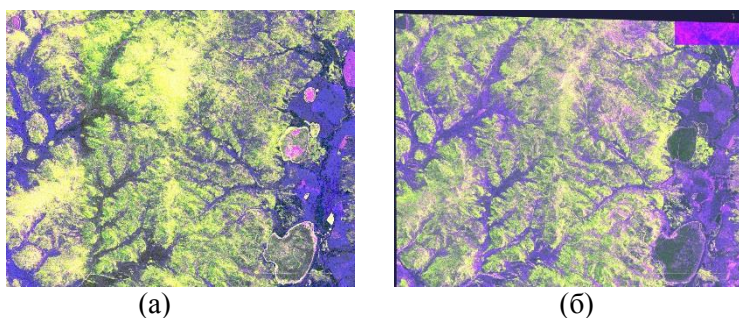


Рис. 9. Двухканальная сегментация (две поляризации), (а) – 9 апреля, и (б) – 14 апреля, red – VV, green- VH, blue – VV/VH.

Вывод о возможности поиска изменений по двухканальным разновременным изображениям не отличается от предыдущего для неконтролируемой классификации.

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. В данной работе текстурная сегментация изображений проводилась на базе статистик второго порядка Харалика [14]: контраста - меры распространения уровней яркости, обратного момента - меры локального сходства и энтропии - мера беспорядка на изображении. ТП вычислялись на РЛИ в движущемся окне [5x5] пикселей 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. 10 показаны RoM текстурные изображения с отношениями статистик второго порядка для каждой поляризации и двух дат с RGB кодировкой: red-контраст, green –энтропия, blue- обратный момент.

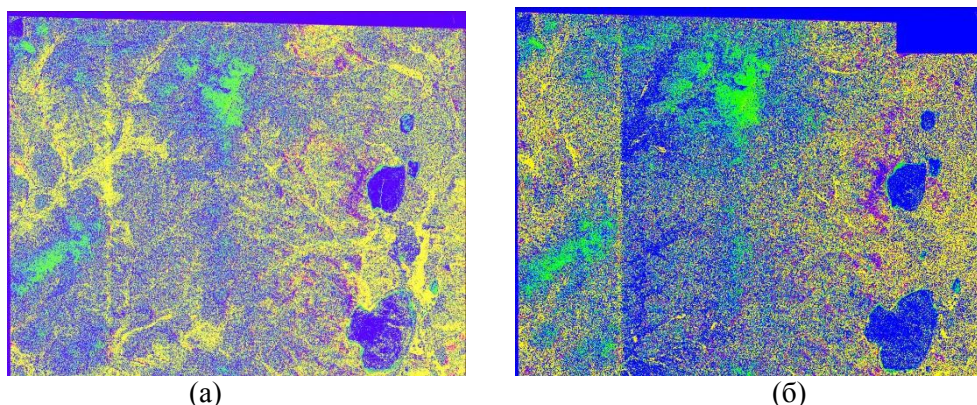


Рис. 10. RGB сегментация отношений ТП за 14 апреля к ТП за 9 апреля, (а) – VV, (б) – VH поляризация.

Отметим сходную картину текстурных RoM изображений на рис. 10 с амплитудными RoM изображениями на рис. 5, а, именно, значительные изменения на VV поляризации отмечаем в области между озерами (увеличенное значение контраста и энтропии 14 апреля в сравнении с 9 апреля). На VH поляризации изменения текстуры не значительны.

Заключение. Задача определения изменений на разновременных радарных изображениях зависит от многих факторов: основные - шероховатость и влажность поверхности, а также параметры съемки, рельеф местности, метеоусловия, тип почв, 'вечная мерзлота' и другие. Все это приводит к сложностям в интерпретации результатов применения различных методов CD к разновременным РЛИ. Особую сложность представляет распознавание влажных областей до и после пожара. Среди использованных в данной работе методов CD наиболее информативны метод RoM в применении как к амплитудным, так и текстурным изображениям. Что касается поляризации, то использование VV поляризации предпочтительней из-за более сильного сигнала в сравнении с VH поляризацией.

ЛИТЕРАТУРА

- [1] *Kasischke E.S., Bourgeau-Chavez L.L., French N.H.F., Harrell P.A., and Christensen N.L.* Initial observations on using SAR to monitor wildfire scars in boreal forests// Intern. J. Rem. Sens. 1992. **13**. P. 3495-3501.
- [2] *Landry R., Ahern F.J., and O'Neil R.* Forest burn visibility on C-HH radar images// Canadian J. Rem. Sens. 1995. **21**. P. 204-206.
- [3] *El-Rayes M.A, Ulaby F.T.* Microwave dielectric spectrum of vegetation//IEEE Trans. GRS. 1987. GE-25(5). P. 541-557.
- [4] *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. **32**. P. 206-210.
- [5] *French N. H. F., Kasischke E. S., Bourgeau-Chavez L.L., and Harrell P. A.* Sensitivity of ERS-1 SAR to variations in soil water in re-disturbed boreal forest ecosystems// International Journal of Remote Sensing. 1996. **17**. P.3037–3053.
- [6] *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. **28**. P. 217–227.
- [7] <https://sentinel.esa.int/web/sentinel/missions/sentinel-1/data-products> (дата обращения 05.06.2015)
- [8] <http://fires.kosmosnimki.ru> (дата обращения 05.06.2015)
- [9] <http://леслужба.забайкальский край.рф> (дата обращения 05.06.2015)
- [10] <https://sentinel.esa.int/web/sentinel/toolboxes/sentinel-1> (дата обращения 05.06.2015)
- [11] *Radke R. J., Andra S., Al-Kofahi O., Roysam B.* Image change detection algorithms: a systematic survey// IEEE Transactions on Image Processing. 2005. **14** (3). P. 294–307. doi:10.1109/TIP.2004.838698
- [12] *Кронберг П.* Дистанционное изучение Земли: Основы и методы дистанционных исследований в геологии. Москва, Мир, 1988. —343с., ил. Пер. с нем.
- [13] *Ranson K.J. and G.Sun.* Effects of environmental conditions on boreal forest classification and biomass estimates with SAR// IEEE Trans. GRS. 2000. **38**. P. 1242-1252.
- [14] *Haralick R.M.* Textural Features for Image Classification// IEEE. Trans. Syst. Man and Cybernetics. 1973. **3** (6). P. 610-621.