

Всероссийская открытая научная конференция «Современные проблемы дистанционного зондирования, радиолокации, распространения и дифракции волн» - «Муром 2020»

Оценка динамики после пожарного состояния растительности на территории Ивано - Арахлейского природного парка (Забайкальский край) по радарными оптическим данным спутников Sentinel 1/2

Н.В. Родионова, И.Л. Вахнина, Т.В. Желибо

Институт радиотехники и электроники им. В.А. Котельникова РАН, Фрязинский филиал, Фрязино, Московская обл. e-mail: rny@ire.rssi.ru

Институт природных ресурсов, экологии и криологии СО РАН, г. Чита

Приводятся результаты анализа многовременных данных спутникового мониторинга состояния растительности на территории Ивано- Арахлейского природного парка (Забайкальский край) после пожара 2015 года по радарным данным Sentinel 1 и оптическим данным Sentinel 2. Для оценки динамики восстановления растительного покрова, подвергнутого воздействию природного пожара, использованы спектральные индексы NDVI, NBR, MIRBI, NDRE и радарный вегетационный индекс RVI. Показана положительная динамика в состоянии растительности за прошедшие после пожара 2016-2019 годы через рост вегетационных индексов NDVI, NBR, NDRE, RVI. Показано влияние атмосферы на значения вегетационных индексов.

The results of the analysis of multi - temporal data of satellite monitoring of the state of vegetation in the territory of Ivano-Arakhleyskogo natural Park (Zabaikalskykrai) after the fire in 2015 are presented using Sentinel 1 radar data and Sentinel 2 optical data. The spectral indices NDVI, NBR, MIRBI, NDRE and the radar vegetation index RVI were used to assess the dynamics of vegetation restoration after a natural fire. The positive dynamics in the vegetation state for the years 2016-2019 after the fire is shown through the growth of vegetation indices NDVI, NBR, NDRE, RVI. The influence of the atmosphere on the values of vegetation indices is shown.

Введение

Один из самых высоких уровней пожарной активности в Сибири наблюдается в Забайкальском крае. Климат здесь резко континентальный, характерным является наличие вечной мерзлоты. Земля глубоко промерзает на 1-1.5 метра и медленно оттаивает. Возобновление растительности существенно затруднено из-за малого количества осадков, 90% которых (в пределах 300 мм) выпадает в теплый период, преимущественно в июле-августе. Зимы малоснежные, и почва не увлажняется за счет снега. Это приводит к тому, что весной регион очень сильно горит. Специалисты [1] выяснили, что успешному возобновлению забайкальского леса препятствует ряд причин: 1) высокая температура почвы на горях, приводящая к высыханию молодых деревьев, 2) недостаток влаги и питательных веществ, приводящие к жесткой конкуренции между растениями и разрастанию травы, 3) повторные пожары.

Для мониторинга развития леса после пожара используются данные дистанционного зондирования Земли и наземные данные.

В работе [2] описываются проведенные в 2013-2014 годах наземные исследования состояния древесной растительности на территории Ивано - Арахлейского природного парка после низовых пожаров 2000, 2001, 2003 и 2010 годов. Пробные площадки, заложенные на юго-восточных склонах Осинового хребта, имеют характерные типы леса листвяги рододендровые, брусничные и ерниковые. Эти древостои были подвержены низовым пожарам различной интенсивности. В результате исследования показано, что естественное возобновление древесных пород характеризуется как неудовлетворительное.

В середине апреля 2015 года в Забайкалье в районе Беклемишевской системы озер наблюдались сильные лесные пожары. На рис. 1 (а) приведена карта пожаров на этой

территории за 14 апреля 2015 года по данным системы оперативного мониторинга СКАНЭКС, сервис “Космоснимки- Пожары” (<http://fires.kosmosnimki.ru>). В работе [3] по радарным изображениям спутника Sentinel 1(S1) определялись области гарей в данном районе на базе использования амплитудной и текстурной информации.

После 2015 года территории Ивано-Арахлейского парка в течение четырех лет не подвергались воздействию огня.

В данной работе прослеживается динамика восстановления растительности за 4 года, прошедшие после пожара 2015 года, на территории Ивано-Арахлейского природного парка по радарным и оптическим данным спутников Sentinel 1/2.

Характеристика районов исследования

В горно-таежных лиственничных ландшафтах Кондинского остепненно-котловинного округа выделены модельные площади для исследования динамики изменения растительных сообществ (рис.1(б)). Площадь на хребте Осиновый, расположенная в бассейне р. Осиновка, условно названа “Осиновка”, площадь на Яблоновом хребте в бассейне р. Рышмалей названа “Рышмалей”. Подробные описания площадок в Осиновке с фотосъемкой общего вида пробных площадей, по которым проводились работы в 2018 году сотрудниками Института природных ресурсов, экологии и криологии СО РАН, г. Чита, даны в таблице.

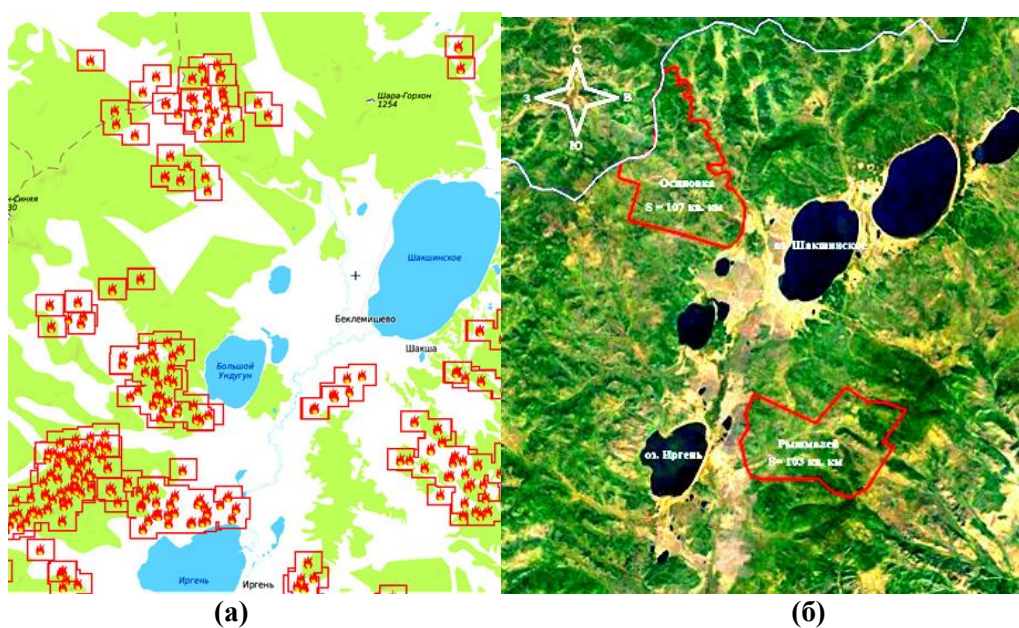







Рис.1. Карта пожаров за 14.4.2015 (а), расположение модельных площадей для исследования динамики изменения растительных сообществ (б)

В данной работе из 49 площадок были выбраны 12 площадок в Осиновке с номерами №№ 3, 13, 16, 19, 20, 41, 42, 46, 52, 53, 71, 72, на территориях, где были гари после пожаров 2015 года.

На рис. 2 показано Sentinel2 (S2) изображение исследуемого района, дата съемки 31.7.2018, где красными прямоугольниками отмечено местоположение тестовых площадок, объединенных в 4 группы: 1 – площадки с номерами №20, №52, №53, №72; 2 - №19, № 71; 3 - №3, №13; 4 - №41, №42, №46. И между 3 и 4 группами расположена площадка №16.

Таблица. Описание тестовых площадок в Осиновке

№ пп	Координаты	Высота, м	Тип сообщества	Нарушенность территории	Фото
3	52.20855° N, 112.56738°E	1070		Гарь по вырубке	
13	52.20631°, 112.56490°	1029	Ерник злаковый	Гарь	
16	52.19739°, 112.57023°	996	Листвяг разнотравный	Горельник, ветровал	
19	52°12'24,9'', 112°32'40,3''	1053	Листвяг брусничниковый	Гарь, ветровал	
20	52°12'42,0'', 112°32'02,5''	1099	Листвяг брусничниковый	Гарь, ветровал	
41	52.18975°, 112.54653°	1051	Листвяг разнотравный	Гарь, ветровал	
42	52.19275°, 112.54384°	1021	Листвяг разнотравный	Гарь	
46	52.19133°, 112.54929°	1026	Листвяг ерниковый	Гарь, ветровал	
52	52.21100°, 112.53900°	1068	Листвяг рододендроновый	Гарь, ветровал	
53	52.21421°, 112.53182°	1071	Листвяг разнотравный	Горельник, ветровал	
71	52.20604°, 112.55075°	1044	Листвяг брусничниковый	Гарь, ветровал	

72	52.21030°, 112.53596°	1102	Листвяг брусничниковый	Гарь, ветровал	
----	--------------------------	------	---------------------------	----------------	---

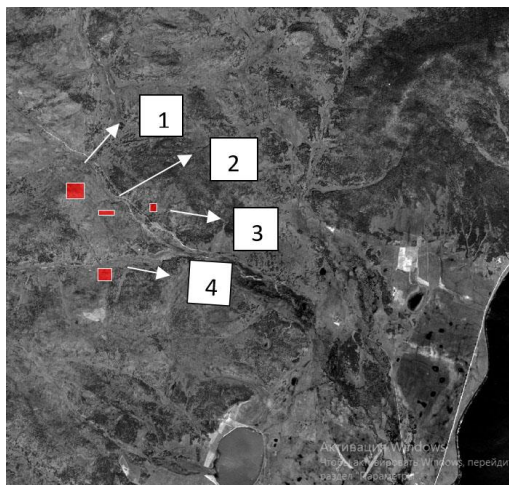


Рис. 2. Расположение тестовых площадок, объединенных в 4 группы

Используемые данные и методы исследования

Исходные радарные данные Sentinel 1. Радарный вегетационный индекс

В работе использованы находящиеся в открытом доступе Sentinel 1 радарные данные С-диапазона IW (interferometric wide-swath) моды с поляризацией VV и VH и пространственным разрешением 10 м. Работа с изображениями S1 осуществлялась с помощью программы SNAP (<https://sentinel.esa.int/web/sentinel/toolboxes/sentinel-1>). Предварительная обработка данных включала выделение фрагмента с исследуемой областью и радиометрическую калибровку.

Для определения среднего значения по профилю коэффициента обратного рассеяния (КОР) для исследуемых 12 площадок были взяты сеансы S1 за 26.07.2017, 02.08.2018 и 28.07.2019 годов. Для сравнения с площадками с гарями была выбрана фоновая площадка, где пожара в 2015 году не было, в северной части Шакшинского озера, координаты профиля 52.2037°с.ш., 112.7229°в.д.. На рис. 3 (а) показан график изменения КОР в дБ для 12 площадок и фоновой площадки за 2017-2019 годы. Нумерация площадок по оси абсцисс осуществлялась по группам с 1 по 4, далее площадка с №16 и фоновая площадка. Значения КОР увеличились для обеих поляризаций за период 2017-2019 для всех тестовых участков. Наибольшие изменения КОР отмечены для кросс - поляризации VH. Так, для площадки №20 изменения составляют за два года 6.6 дБ, т.е. значительное увеличение объемного рассеяния, связанное с ростом растительности, тогда как для VV поляризации 1.8 дБ. Самые малые изменения КОР VH поляризации составляют 2.5 дБ для фоновой площадки.

Коэффициент обратного рассеяния является абсолютным поляриметрическим параметром, тогда как радарный вегетационный индекс (radar vegetation index (RVI)) [4] является относительным параметром, который не очень чувствителен к углу обзора и природным условиям. RVI используют для мониторинга уровня роста растительности по многовременным радарным данным:

$$RVI = \frac{8\sigma_{HV}}{\sigma_{HH} + \sigma_{VV} + 2\sigma_{HV}} \quad (1)$$

RVI меняется от 0 (гладкая голая почва) до 1 по мере роста растительности и является мерой объемного рассеяния. Для Sentinel 1 моды IWGRD есть только две поляризации VV и VH. Тогда в предположении [5], что $\sigma_{HH} \approx \sigma_{VV}$, уравнение (1) можно представить в виде: $RVI = \frac{4\sigma_{VH}}{\sigma_{VV} + \sigma_{VH}}$. Предположение [5] справедливо при пренебрежимо малом взаимодействии между почвой и растительностью [6]. RVI коррелирует с VWC (Volumetric Water Content), LAI (Leaf Area Index) и NDVI (Normalized Difference Vegetation Index) и слабо чувствителен к природным условиям [7]. На рис. 3 (б) показан график изменения RVI для исследуемых тестовых участков с датами съемки 26.7.17, 2.8.18, 28.7.19. Наибольший рост RVI характерен для площадок из 1 группы, самой северной по расположению. Отметим значительный рост растительности для площадки №20, где RVI изменилось с 0.385 в 2017 году до 0.99 в 2018 году. Для этой же площадки отмечалось выше увеличение KOP на 6.6 дБ для VH поляризации. Несколько меньший рост RVI получен для площадки №52 с увеличением RVI на 0.5 и для площадки №42 с увеличением RVI на 0.35. Уменьшение RVI за два года отмечено для площадки №46 и фоновой площадки.

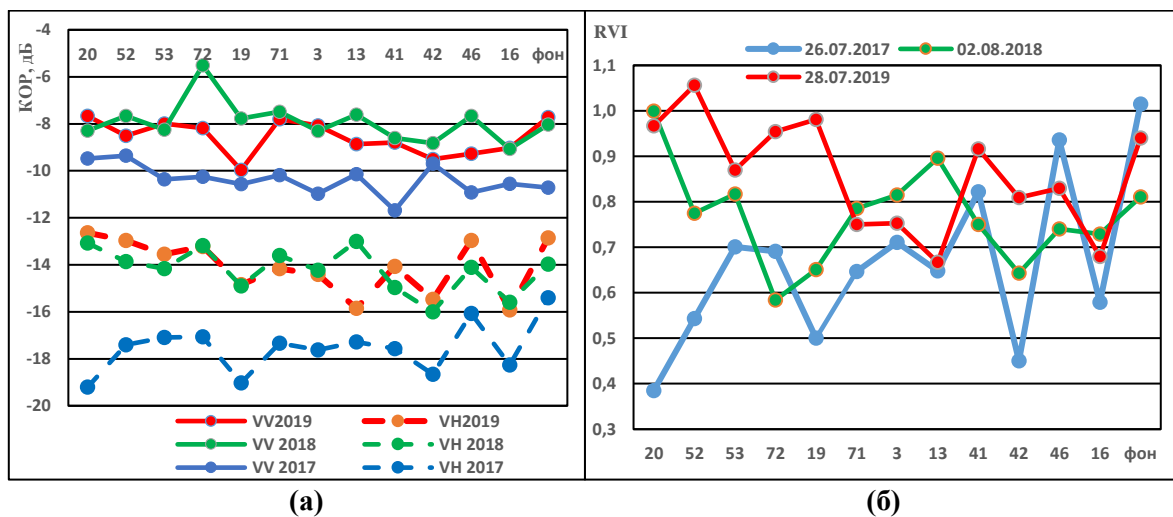
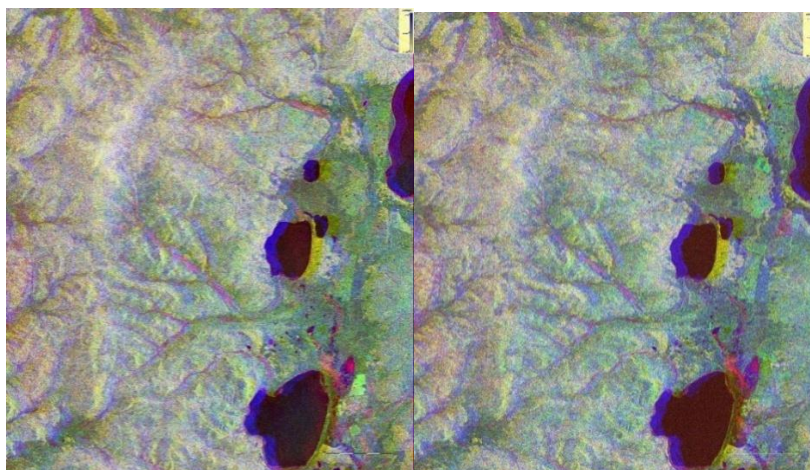


Рис. 3. Изменение коэффициента обратного рассеяния (а) и RVI (б) для тестовых участков за 2017-2019 годы

На рис. 4 приведены изображения исследуемой территории для обеих поляризаций в RGB кодировке red- дата съемки 26.7.2017, green – 2.8.2018, blue – 28.7.2019. Все изменения происходили за прошедшие годы 2017-2019 на территории гарей, появившихся после пожара 2015 года. И эта территория обозначилась в правой части рис. 4. Многовременные радарные изображения позволили выявить области гарей. Остальная территория изменилась незначительно.



VVVH

Рис. 4. Изображения исследуемой территории в RGB кодировке: red-26.7.2017, green – 2.8.2018, blue – 28.7.2019

Исходные мультиспектральные данные Sentinel 2. Спектральные индексы

Спутник Sentinel2A(S2A) был запущен в июне 2015 года, а Sentinel2B(S2B) в марте 2017 года. Спутники ESAS2Aи S2B имеют пространственное разрешение (ПР) 10-60 м, периодичность совместной съемки 5 дней. В мультиспектральной камере спутников 13 спектральных каналов: прибрежный аэрозоль (B1), три канала видимого диапазона длин волн (B2, B3, B4), четыре red-edgeканала (B5, B6, B7 и B8a), два канала ближнего ИК диапазона (NIR: B8, B9) и три SWIR канала (B10, B11 и B12). Обработка изображений осуществлялась программой SNAP.

Мультиспектральные сенсоры широко используют для оценки степени опасности пожара и для после пожарной динамики восстановления растительности. Большинство авторов применяют при этом спектральные каналы Red (B4), NIR (B8) и SWIR (B11 и B12).

Спектральные индексы (СИ), получаемые по оптическим данным ДЗЗ, такие как NormalizedDifferenceVegetationIndex (NDVI)[8] (нормализованный вегетационный индекс (ВИ)), NormalizedBurnRatio (NBR) (нормализованный индекс гари[9]) и их модификации dNDVI - разностный ВИ, dNBR - разностный индекс гари, определяющие разность индексов до и после пожара, дают хорошие результаты по выявлению участков с повреждением растительного покрова. Графики на основе индексов гарей NBR и dNBR отражают динамику и характер восстановления растительного покрова на выгоревших территориях[10].В настоящей работе не удалось использовать разностные индексы, поскольку до пожарные данные приходились на 2014 год, когда съемки Sentinel 2 еще не было.

В данной работе наряду с традиционно используемыми СИ NDVIи NBR для оценки уровня восстановления растительности после пожаров, используются СИ MIRBI(Mid-InfraredBurnIndex) [11]иNDRE (normalizeddifferenced-red-edgeindex) [12], в формулу для последнего входит red-edgeканал S2B6.

Для определения ВИ по профилям для исследуемых 12 площадок были взяты сеансы S2за 31.7.2016, 5.08.2017, 31.07.2018 и 26.7.2019. Выбор снимков определялся прежде всего отсутствием облачности для июля месяца и близостью дат к датам радарной съемки. Поскольку для ряда площадок за 26.7.2019 территории были закрыты облаками или их теньями, то данные для площадок №20, №41, №42, №53 и №72 были заменены данными за 6.7.2019.

Вегетационный индекс NDVI показывает наличие и состояние растительности (относительную биомассу) и определяется по формуле: $NDVI = \frac{NIR-R}{NIR+R}$, где NIR и R – значения коэффициента отражения земной поверхности в ближнем ИК и красном диапазонах спектра. NDVI меняется в диапазоне [-1,1]. Изменения в отражательной способности в видимом и ближнем ИК зонах спектра связаны с уменьшением содержания хлорофилла в вегетативных органах усыхающих деревьев. Полоса поглощения хлорофилла в красной области спектра (0.65 мкм) определяет низкий уровень отражения растительности в видимом диапазоне. В состоянии стресса образование хлорофилла в растениях уменьшается, что приводит к снижению его поглощения в видимом диапазоне и, соответственно, увеличению отражательной способности. В ближнем ИК диапазоне коэффициент отражения зеленой растительностью заметно растет, достигая 45-50% [13].

На рис. 5 (а) показаны графики изменения NDVI для исследуемых тестовых площадок с 2016 по 2019 годы. Интересно, что для всех площадок из 1 группы значения NDVI уменьшились за прошедшие после пожара годы. Возможной причиной является ряд недостатков ВИ NDVI, приводящих к неопределенностям при его количественной оценке. В работе [14] среди таких недостатков отмечены следующие: нелинейность, влияние атмосферы (водяной пар и аэрозоли), насыщение при больших значениях биомассы, чувствительность к наличию облачности, влияние почвы, геометрии объекта, влияние спектральных эффектов (разные инструменты). Главным же ограничением NDVI и подобных ему индексов в том, что оптические сенсоры могут осуществлять мониторинг только очень тонкого слоя растительного покрова, и не могут давать информацию о древесной растительности. Ниже будет показано влияние на количественное значение СИ, включая и NDVI, атмосферной коррекции.

Нормализованный индекс гари NBR определяется по формуле [9]:

$$NBR = \frac{NIR - SWIR2}{NIR + SWIR2}$$

где SWIR2 – значение коэффициента отражения земной поверхности в среднем ИК канале, центральная длина волны 2202.4 мкм (S2A) и 2185.7 мкм (S2B) (канал B12, ПР=20 м).

Средняя ИК область спектра отражает изменения в содержании в растениях влаги, а также изменения структуры полога и структуры листьев. Совместное использование средней ИК области спектра с ближней ИК областью, которая не зависит от насыщенности влагой растения, но зависит от структуры листа, повышает точность оценки содержания влаги в растении вне зависимости от структуры листа [15].

На рис. 5 (б) показаны графики изменения NBR для рассматриваемых тестовых площадок для 2016-2019 годов. Судя по изменению значений NBR за 2016-2019 гг, содержание влаги в растениях для всех тестовых площадок, ранее подверженных огню, увеличилось, и практически осталось тем же для фоновой площадки, где пожара не было.

Наибольшее увеличение NBR отмечено для площадок №3, №41 и №53, больше 0.2. Для площадок №13 и № 71 – больше 0.15. Наименьшее изменение NBR, равное 0.05, отмечено для фоновой площадки.

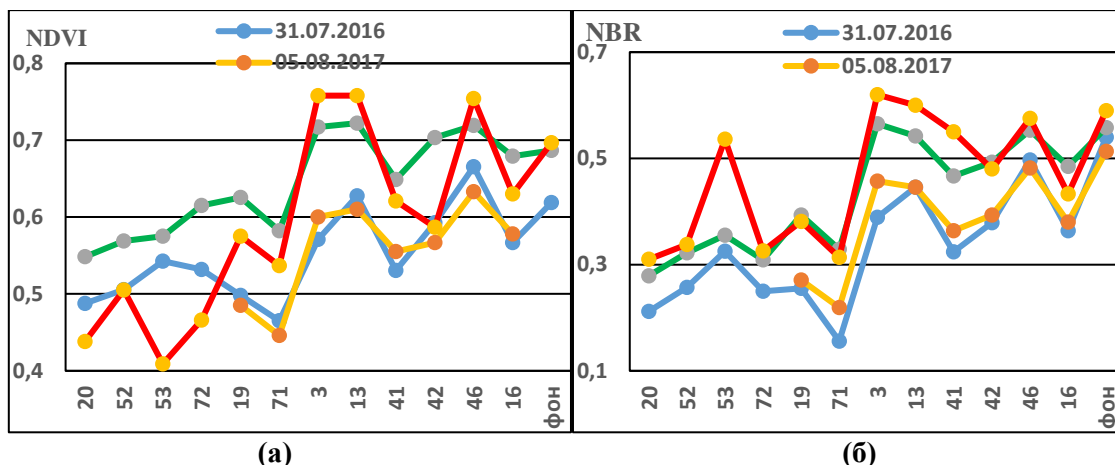


Рис. 5. Изменение NDVI (а) и NBR (б) для тестовых площадок за 2016-2019 годы

В работе [16] для оценки тяжести пожара и после - пожарной динамики восстановления растительности предлагается совместно использовать два СИМIRBI [11] (для оценки степени тяжести пожара) и NDRE [12] (для оценки динамики восстановления растительности), в формулу для которого добавляется RedEdge канал. В работе [17] показано, что ВИ на основе RedEdge канала (индикаторы содержания хлорофилла) весьма полезны для количественной оценки поражения лесов из-за пожара.

Спектральный индекс MIRBI [11], определяется через два SWIR канала. Авторы [11]нашли, что комбинация этих двух каналов обладает способностью к сильному спектральному разделению областей, подвергшихся пожарам и не горевших.

$$MIRBI = 10 \times SWIR2 - 9.8 \times SWIR1 + 2$$

Способность СИ MIRBI по своим значениям разделять области с гарями и с их отсутствием показана на рис.6 (а). Так, для фона (область, не подвергавшаяся воздействию огня), MIRBI не изменила значений за 3 года. Для всех остальных 12 площадок произошло спектральное разделение по уровню изменения MIRBI за 3 года. Самые большие изменения характерны для площадок 2-ой группы (№19 и №71), и несколько меньшие для площадок №16 и №46. Для площадок №41 и №52 изменения MIRBI незначительные. Степень тяжести пожара для площадок 1 группы меньшая в сравнении с площадками 2-ой группы.

Спектральный индекс NDRE определяется по формуле [12]:

$$NDRE = \frac{(NIR - Red\ Edge)}{(NIR + Red\ Edge)}$$

где RedEdge – канал B6 Sentinel 2. На рис. 6 (б) приведены графики изменения СИ NDRE для 13 площадок для дат съемки 31.7.2016, 31.7.2018 и 6, 26.7.2019. Увеличение значений NDRE произошло для всех площадок, кроме №46. Наибольшее увеличение отмечается для площадки №16и площадок 3 группы.

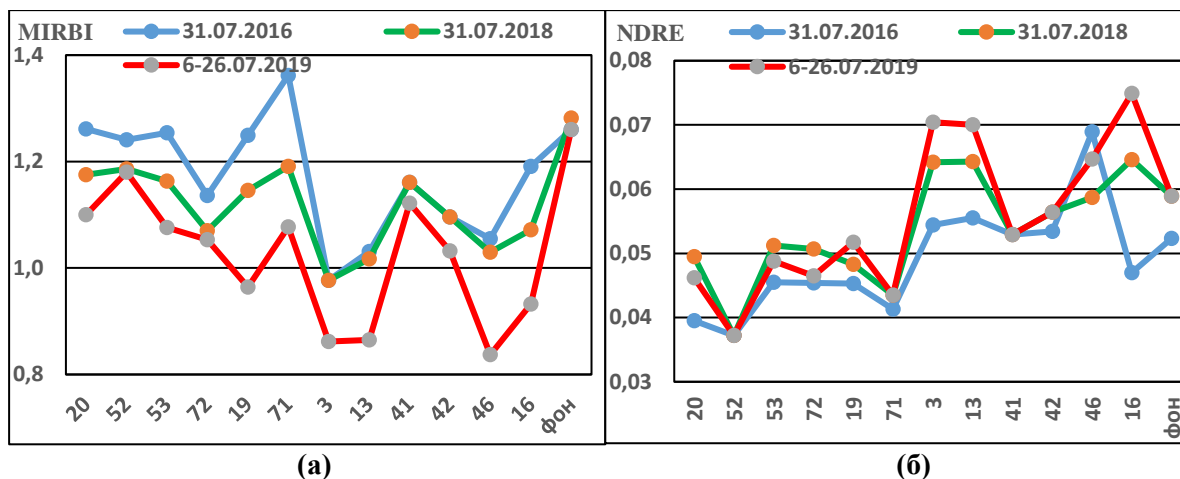


Рис. 6. Изменение значений СИ MIRBI и NDRE за 2016-2019 годы

Интересно отметить зависимость от широты места значений СИ, прослеживаемую по графикам NDVI, NBR на рис. 5 и NDRE на рис. 6 (б), а, именно, значения СИ уменьшаются с увеличением географической широты тестовой площадки. То есть растительность на тестовых площадках с более северным расположением характеризуется меньшей биомассой, меньшим содержанием влаги и хлорофилла.

На рисунке 7 показан сводный график изменений по абсолютной величине индексов: радарного вегетационного RVI (2017-2019 годы) и спектральных NBR, MIRBI, NDRE (2016-2019 годы), в порядке размещения тестовых площадок по группам. Отметим следующее: 1) значительное отличие изменений по рассматриваемым индексам за прошедшие с 2015 годы для фоновой площадки от всех остальных, здесь изменения наименьшие, 2) площадки 1 группы выделились повышенным увеличением объемного рассеяния, 3) площадки 2 группы отличает более высокая тяжесть пожара и значительное увеличение объемного рассеяния, 4) площадки 3 группы отличает увеличение содержания влаги и хлорофилла в растениях, при малом объемном рассеянии, 5) площадки 4 группы отличает малое изменение содержания хлорофилла, увеличение влаги в растениях, увеличение объемного рассеяния, 6) для площадки №16 есть отличие в большей тяжести пожара, наибольшее увеличение содержания хлорофилла в сравнении с другими площадками.

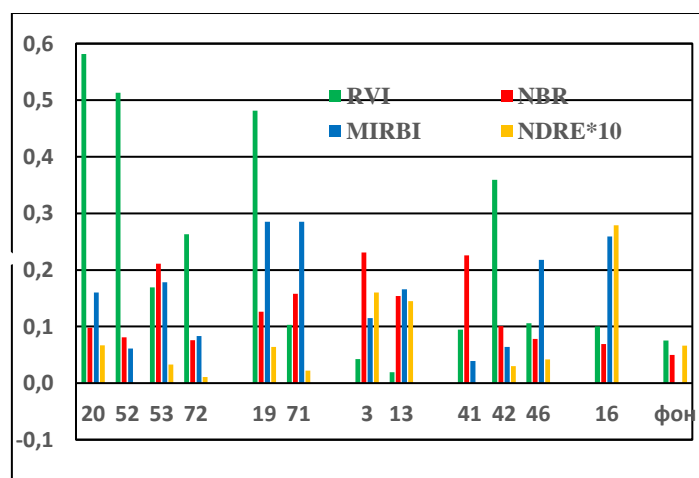


Рис.7.Изменение значений по абсолютной величине радарного и спектральных индексов для исследуемых площадок

Исходя из рассмотренных спектральных индексов NDVI, NBR, MIRBI и NDRE можно сделать общий вывод о положительной динамике восстановления растительности после пожара 2015 года на 12 рассматриваемых площадках на территории Ивано - Арахлейского природного парка. Наибольшая тяжесть пожара, исходя из индекса MIRBI, отмечена для площадок 2 группы, и далее по убывающей, для площадки №16, 1, 3 и 4 групп. Значения индекса NBR, отражающего наличие влаги в растительности, и индекса NDRE, индикатора содержания хлорофилла, увеличились за послепожарные годы для всех тестовых площадок. На базе радарного вегетационного индекса RVI показано увеличение объемного рассеяния, связанного с ростом растительности, для всех площадок, в большей степени для 1 группы, и по убывающей для 2 и 4.

Влияние атмосферной коррекции на значения спектральных индексов

Луч дважды проходит через атмосферу прежде чем попасть в сенсор спутника. Атмосферное влияние на сигнал связано с рассеянием на частицах аэрозолей и молекулах газов, и поглощением газами. Данные съемочной системы Sentinel 2 предоставляются с уровнем обработки L1C в виде альбеда на верхней границе атмосферы (TOA – Top-Of-Atmosphere Reflectance) с радиометрической и геометрической коррекцией. Обработка этих данных до уровня L2A в виде альбеда на нижней границе атмосферы (BOA – Bottom-Of-Atmosphere) возможна с помощью бесплатной программы атмосферной коррекции Sen2Cor.

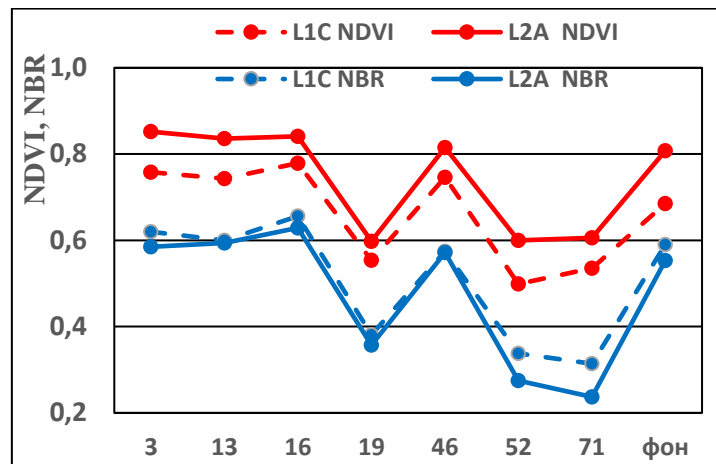
Покажем, как изменились значения рассматриваемых в данной работе СИ после атмосферной коррекции (АК). На рисунке 8 приведены графики значений NDVI, NBR, MIRBI и NDRE до и после АК для некоторых из рассматриваемых площадок для даты 26.7.2019 (не удалось сделать для всех площадок из-за наличия облачности на изображениях S2). Как следует из графиков для NDVI и NBR (рис. 8(а)), из этих двух СИ более сильное влияние АК оказывает на NDVI, значение которого после АК увеличивается более, чем на 10% для отдельных площадок (№3, №13, №52, фон). Значительно меньшее воздействие оказывает АК на СИ NBR. Значения СИ NBR практически не изменились после АК для всех площадок, кроме №52 и №71, причем количественно значения уменьшились. Аналогично NBR, на численные значения СИ MIRBI и NDRE АК оказывает незначительное влияние (рис.8 (б), (в)). Из чего можно сделать вывод о более высокой атмосферной устойчивости спектральных индексов NBR, MIRBI, NDRE в сравнении с NDVI.

На рис. 9 показаны два изображения S2 исследуемой территории (в нижнем правом углу - озеро Шакшинское), дата съемки 26.7.2019, в естественных цветах путем комбинации каналов B2, B3 и B4, до (рис. 9а) и после (рис.9б) атмосферной коррекции. Размер изображений 1407*1159 пикселей.

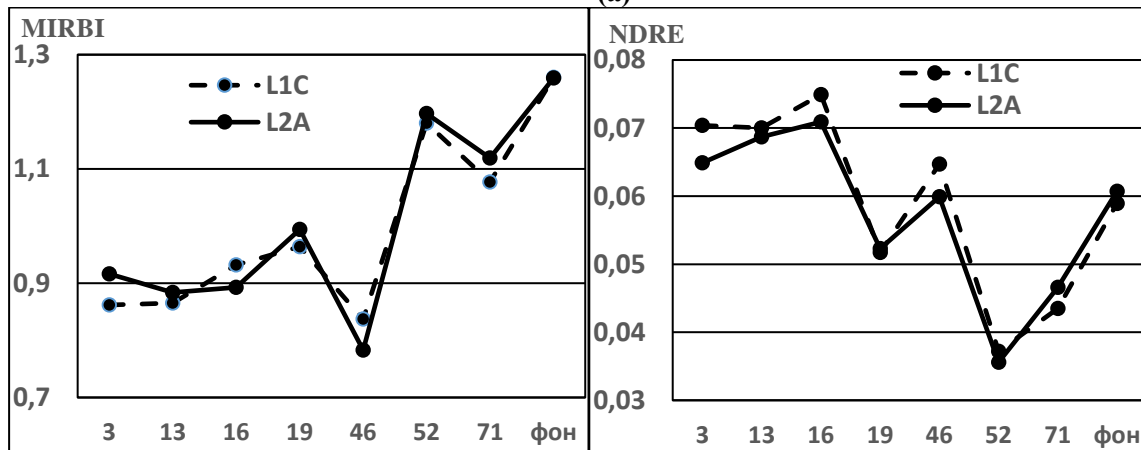
Заключение

В настоящей работе дана оценка динамики восстановления растительности на территории Ивано - Арахлейского парка после природных пожаров в апреле 2015 года по радарным и оптическим данным спутников Sentinel 1/2. Используемые спектральные индексы NDVI, NBR, MIRBI, NDRE и радарный вегетационный индекс RVI показали положительную динамику в состоянии растительности на 12 тестовых площадках за прошедшие после пожара 2016-2019 годы. через рост вегетационных индексов NDVI, NBR, NDRE, RVI. Показан рост значений вегетационных индексов по мере уменьшения широты места расположения исследуемых площадок. Показано, что из используемых для оценки тяжести пожара и после пожарного восстановления

растительности СИ более высокой атмосферной устойчивостью обладают спектральные индексы NBR, MIRBI и NDRE в сравнении с NDVI.



(а)



(б)

(в)

Рис. 8. Значения СИ NDVI и NBR (а), MIRBI (б), NDRE (в) до и после атмосферной коррекции:

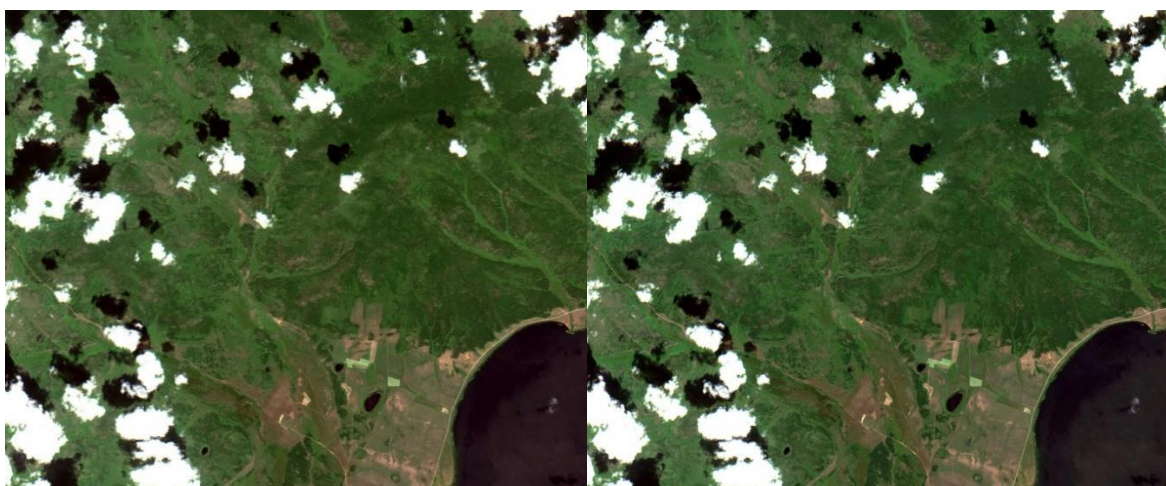


Рис. 9. Сравнение двух изображений S2 в естественных цветах (каналы B2, B3, B4) дата съемки 26.7.2019 до (а) и после(б) атмосферной коррекции

Авторы выражают благодарность Макарову Владимиру Петровичу, к.б.н., с.н.с. лаб. географии и регионального природопользования ИПРЭК СО РАН за организацию полевых работ на исследуемой территории в районе Беклемишевской впадины.

Работа выполнена в рамках государственного задания Института радиотехники и электроники им. В.А. Котельникова РАН.

Литература

1. Shvetsov E.G., Kukavskaya E.A., Buryak L.V., Barrett K. Assessment of post-fire vegetation recovery in Southern Siberia using remote sensing observations//*Environ. Res. Let.* 2019. V. 14. P. 1-10. [https:// doi.org/10.1088/1748-9326/ab083d](https://doi.org/10.1088/1748-9326/ab083d).
2. Горбунов И.В., Макаров В.П., Малых О.Ф. Послепожарное состояние древесной растительности на территории Ивано-Арахлейского природного парка (Забайкальский край)// *Успехи современного естествознания*. 2015. №7. С. 54-59.
3. Родионова Н.В. Возможность обнаружения гарей по разновременным радарным изображениям SENTINEL 1 для районов юга Сибири в сезон весна-лето 2015// ж. "Современные проблемы дистанционного зондирования Земли из космоса". 2016. Т. 13. №2. С. 164-175.
4. Kim Y., van Zyl J. Vegetation effects on soil moisture estimation// *Proc. IGARSS' 2004*. Vol.2. P. 800-802.
5. Charbonneau F., Trudel M., Fernandes R. Use of dual polarization and multi-incidence SAR for soil permeability mapping//*In: Advanced Synthetic Aperture Radar (ASAR)*. 2005. St-Hubert, Canada.
6. Trudel M., Charbonneau F., Leconte R. Using RADARSAT-2 polarimetric and ENVISAT-ASAR dual-polarization data for estimating soil moisture over agricultural fields//*Can. J. Remote Sensing*. 2012. Vol. 38. No. 4. P. 514-527.
7. Kim Y., van Zyl J. A time-series approach to estimate soil moisture using polarimetric radar data// *IEEE Trans. GRS*. 2009. Vol. 47. No. 8. P. 2519-2527.
8. Rouse J.W., Haas R.H., Schell J.A. Deering D.W. Monitoring vegetation systems in the Great Plains with ERTS// *Third ERTS Symposium*. NASA SP-351 I. 1973. P. 309-317.
9. Key C.H., Benson N.C. Landscape assessment: ground measure of severity, the Composite Burn Index; and remote sensing of severity, the Normalized Burn Ratio. In 'FIREMON: Fire Effects Monitoring and Inventory System'. (Eds DC Lutes, RE Keane, JF Caratti, CH Key, NC Benson, S Sutherland, LJ Gangi) USDA Forest Service, Rocky Mountain Research Station, General Technical Report RMRS-GTR-164-CD: LA. 2005. P. 1–15. (Ogden, UT).
10. Бондур В.Г., Цидилина М.Н., Черепанова Е.В. Космический мониторинг воздействия природных пожаров на состояние различных типов растительного покрова в федеральных округах Российской Федерации// *ИЗК*. 2019. №3. С. 13-32.
11. Trigg S. and Flasse S. An evaluation of different bi-spectral spaces for discriminating burned shrub-savannah//*Int. J. Remote Sensing*. 2001. V. 22. No. 13. P. 2641–2647.
12. Barnes E.M., Clarke T.R., Richards S.E., Colaizzi P.D., Haberland J., Kostrzewski M., Waller P., Choi C., Riley E., Thompson T., Lascano R. J., Li H., Moran M.S. Coincident detection of crop water stress, nitrogen status and canopy density using ground-based multispectral data// Copyright © 2000 ASA-CSSA-SSSA, 677 South Segoe Road, Madison, WI 53711, USA. Proceedings of the Fifth International Conference on Precision Agriculture.
13. Барталев С.А., Егоров В.А., Крылов А.М., Стыценко Ф.В., Ховратович Т.С. Исследование возможностей оценки состояния поврежденных пожарами лесов по данным многоспектральных спутниковых измерений// *Соврем. проблемы ДЗЗ из космоса*. 2010. 7. С. 215-225.

14. *Huete A., Didan K., Miura T.* Overview of the radiometric and biophysical performance of the modis vegetation indices// *Remote Sens. Environ.* 2002. 83. 195. P. 213-221.
15. *Ceccato P., Flasse S., Tarantola S., Jacquemond S., Gregoire J.* Detecting vegetation water content using reflectance in the optical domain//*Remote Sensing of Environment.* 2001. 77. P. 22-33.
16. *Rahman Sh., Chang H.-Ch., Magill Ch., Tomkins K., Hehir W.*Spatio-temporal assessment of fire severity and vegetation recovery utilizing SENTINEL-2 imagery in New South Wales, Australia//*IGARSS' 2019.* P. 9960-9963.
17. *Korets M.A., Ryzhkova V.A., Danilova I.V., Sukhinin A.I., Bartalev S.A.* Forest disturbance assessment using satellite data for moderate and low resolution. In: *Balzter H. (Ed.) Environment Change in Siberia: Earth Observation. Field Studies and modeling.* 2010. Springer.