

# Оценка динамики послепожарного состояния растительности на территории Ивано-Арахлейского природного парка (Забайкальский край) по радарным и оптическим данным спутников Sentinel 1/2

Н.В. Родионова<sup>1</sup>, И.Л. Вахнина<sup>2</sup>, Т.В. Желибо<sup>2</sup>

<sup>1</sup>Фрязинский филиал Института радиотехники и электроники им. В.А. Котельникова РАН, пл. ак. Введенского 1, Фрязино, Россия, 141190

<sup>2</sup>Институт природных ресурсов, экологии и криологии СО РАН, Недорезова 16А, Чита, Россия, 672014

**Аннотация.** 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 (S1) и оптическим данным Sentinel 2 (S2). Для оценки динамики восстановления растительного покрова, подвергшегося воздействию природного пожара, использованы спектральные вегетационные индексы (ВИ) NDVI, ARVI, NBR, NDMI и радарный вегетационный индекс RVI.

## 1. Введение

В Сибири один из самых высоких уровней пожарной активности наблюдается в Забайкальском крае. Возобновление растительности в этом районе существенно затруднено из-за засушливого климата. Здесь выпадает мало осадков, 90% из них (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 горячих, приводящая к гибели подроста, 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 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: лиственничные, брусничные и ерниковые. Эти древостои были подвержены низовыми пожарами 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 рисунке 1 (а) приведена карта пожаров на

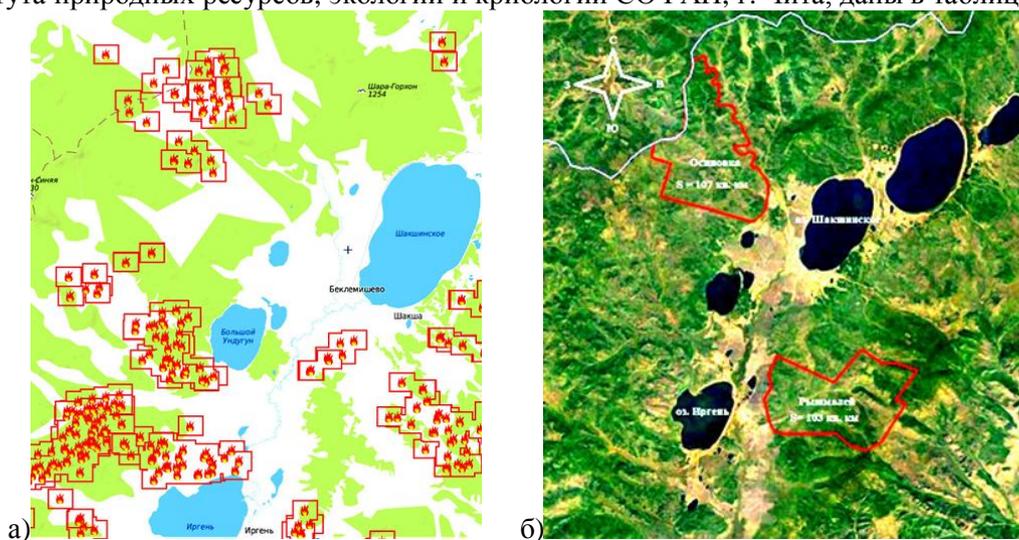
территории Осиновки за 14 апреля 2015 года по данным системы оперативного мониторинга СКАНЭКС, сервис “Космоснимки- Пожары” [3]. В работе [4] по радарным изображениям спутника Sentinel 1 определялись области гарей в данном районе на базе использования амплитудной и текстурной информации.

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

В настоящей 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. Задача состоит в выяснении того, происходит ли восстановление растительности и как этот процесс меняется по годам. Выбор спутниковых данных обусловлен тем, что они обладают высоким пространственным разрешением, и, что особенно важно, находятся в открытом доступе.

## 2. Характеристика районов исследования

В горно-таежных лиственных ландшафтах Кондинского горнотаежного остепненно-котловинного округа выделены модельные площади для исследования динамики изменения растительных сообществ (рисунок 1 (б)). Площадь на хребте Осиновый расположенная в бассейне р. Осиновка, условно названа “Осиновка”, площадь на Яблоневом 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.



**Рисунок 1.** Карта пожаров на 14.04.2015 г. по данным системы оперативного мониторинга СКАНЭКС, сервис “Космоснимки- Пожары” [3] (а), расположение модельных площадей для исследования динамики изменения растительных сообществ(б).

**Таблица 1.** Описание тестовых площадок в Осиновке.

№ пп	Координаты	Высота, м	Тип сообщества	Нарушенность территории	Фото
1	52.20855° N, 112.56738°E	1070		Гарь по вырубке	

2	52.20631°, 112.56490°	1029	Ерник злаковый	Гарь	
3	52.19739°, 112.57023°	996	Листвяг разнотравный	Горельник, ветровал	
4	52°12'24,9'', 112°32'40,3''	1053	Листвяг брусничниковый	Гарь, ветровал	
5	52°12'42,0'', 112°32'02,5''	1099	Листвяг брусничниковый	Гарь, ветровал	
6	52.18975°, 112.54653°	1051	Листвяг разнотравный	Гарь, ветровал	
7	52.19275°, 112.54384°	1021	Листвяг разнотравный	Гарь	
8	52.19133°, 112.54929°	1026	Листвяг ерниковый	Гарь, ветровал	
9	52.21100°, 112.53900°	1068	Листвяг рододендроновый	Гарь, ветровал	
10	52.21421°, 112.53182°	1071	Листвяг разнотравный	Горельник, ветровал	
11	52.20604°, 112.55075°	1044	Листвяг брусничниковый	Гарь, ветровал	
12	52.21030°, 112.53596°	1102	Листвяг брусничниковый	Гарь, ветровал	

Климат в исследуемом районе резко континентальный, характерным явлением следует отметить наличие вечной мерзлоты. Земля глубоко промерзает в зимний период на 1-1,5 метра и медленно оттаивает.

### 3. Используемые данные и методы исследования

#### 3.1. 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 пространственным разрешением 10 м. Работа с изображениями S1 осуществлялась с помощью программы S1Toolbox и позднее SNAP [5]. Предварительная обработка данных включала в себя выделение фрагмента с исследуемой областью и радиометрическую калибровку.

Для определения среднего значения коэффициента обратного рассеяния (КОР) по профилям 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 рисунке 2 (а) показан график изменения КОР в дБ для 12 площадок плюс фон за 2017-2019 годы. Значения КОР увеличились для обеих поляризаций за период 2017-2019. Наибольшие изменения в КОР отмечены для кросс-поляризации VH. Так, для площадки №5 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 – для площадки №8 – меньше 2 дБ, это значение даже меньше изменений для фонового профиля.

Коэффициент обратного рассеяния является абсолютным поляриметрическим параметром, тогда как радарный вегетационный индекс (radar vegetation index (RVI) [6]) 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 IW GRD есть две поляризации VV и VH. Тогда в предположении [7],

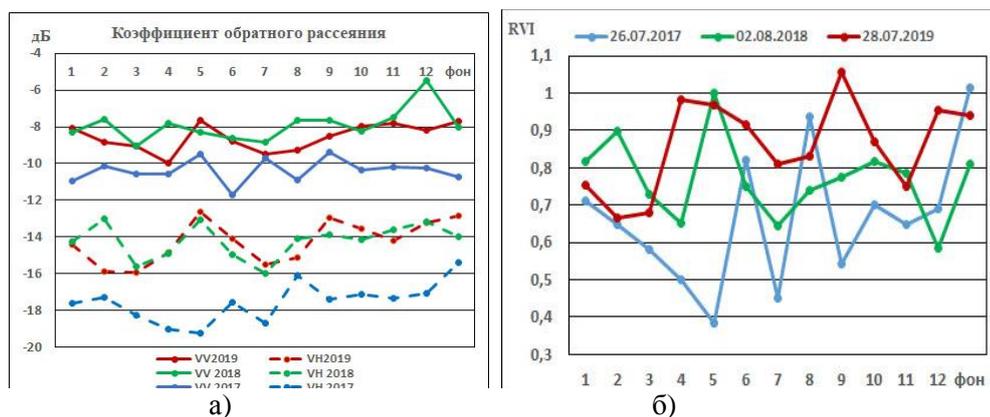
$$\sigma_{HH} \approx \sigma_{VV} \quad (2)$$

уравнение (1) можно представить в виде:

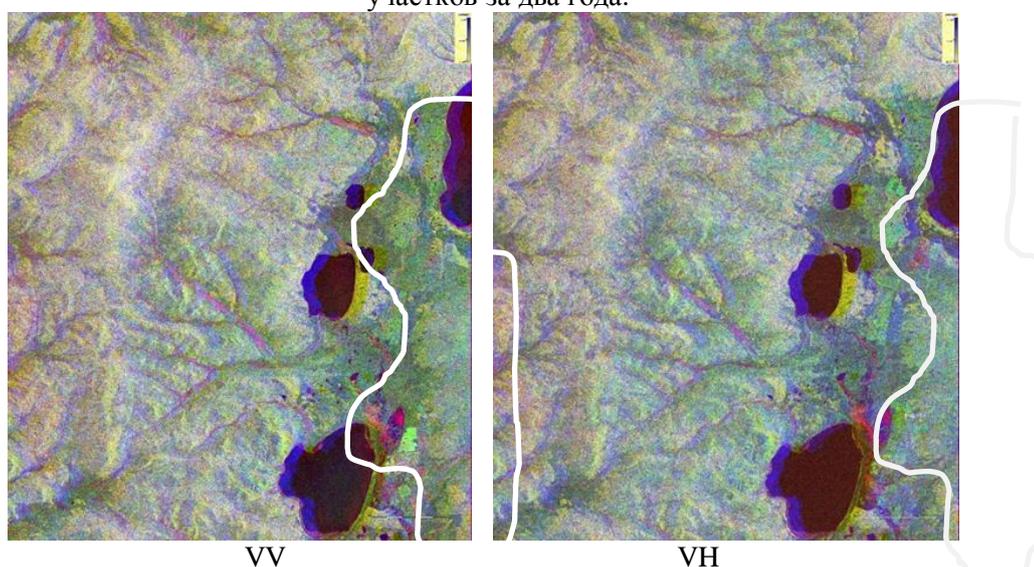
$$RVI = \frac{4\sigma_{VH}}{\sigma_{VV} + \sigma_{VH}}$$

Предположение (2) справедливо при пренебрежимо малом взаимодействии между почвой и растительностью [8]. RVI коррелирует с VWC (Volumetric Water Content), LAI (Leaf Area Index) и NDVI (Normalized Difference Vegetation Index) и слабо чувствителен к природным условиям [9]. На рисунке 2 (б) показан график изменения RVI для исследуемых тестовых участков с датами съемки 26.7.17, 2.8.18, 28.7.19. Отметим значительный рост растительности для площадки с №5, где RVI изменилось с 0.385 в 2017 году до 0.99 в 2018 году. Для этой же площадки отмечалось выше увеличение КОР на 6.6 дБ для VH поляризации. Несколько меньший рост RVI получен для площадки №9 с увеличением RVI на 0.5 и для площадки №7 с увеличением RVI на 0.35. Уменьшение RVI отмечено для площадки №8.

На рисунке 3 приведены изображения исследуемой территории для обеих поляризаций в RGB кодировке: red-26.07.2017, green – 02.08.2018, blue – 28.07.2019. Все изменения происходили за прошедшие годы 2017-2019 на территории гарей, появившихся после пожара 2015 года. И эта территория обозначилась в правой части рисунка 3 (в контуре белого цвета). Многовременные радарные изображения позволили выявить области гарей. Остальная территория изменилась незначительно.



**Рисунок 2.** Изменение коэффициента обратного рассеяния (а), изменение RVI (б) для тестовых участков за два года.



**Рисунок 3.** Изображения исследуемой территории в RGB кодировке: red-26.07.17, green – 2.08.18, blue – 28.07.19.

### 3.2. Исходные мультиспектральные данные Sentinel 2. Вегетационные индексы

Спутник ESA Sentinel 2A был запущен в июне 2015 года, второй Sentinel 2B в марте 2017 года. Периодичность мультиспектральной съемки каждым спутником составляет 10 дней, а при работе двух аппаратов – 5 дней. В мультиспектральной камере 13 каналов с разным пространственным разрешением (PP) от 10 до 60 метров. Обработка изображений осуществлялась программой SNAP.

Для определения ВИ по профилям для исследуемых 12 площадок были взяты сеансы S2 за 31.07.2016, 05.08.2017, 31.07.2018 и 26.07.2019. Выбор снимков определялся прежде всего отсутствием облачности для июля месяца и близостью дат к датам радарной съемки. Поскольку для ряда площадок за 26.07.2019 территории были закрыты облаками или их тенями, то данные для площадок №5, №6, №7, №10 и №12 были заменены данными за 06.07.2019.

Спектральные индексы, получаемые по оптическим данным ДЗЗ, такие как Normalized Difference Vegetation Index (NDVI) [10] (нормализованный вегетационный индекс), Normalized Burn Ratio (NBR) (нормализованный индекс гари [11]) и Normalized Difference Moisture Index (NDMI) (нормализованный индекс влажности [12]) и их модификации dNDVI- разностный ВИ, dNBR- разностный индекс гари, dNDMI –разностный индекс влажности, 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 [13].

Разностные индексы получают при использовании разновременных спутниковых данных. В настоящей работе не удалось использовать разностные индексы, поскольку допожарные данные приходились на 2014 год, когда съемки Sentinel 2 еще не было.

### 3.2.1. NDVI и ARVI

NDVI – ВИ, показывающий наличие и состояние растительности (относительную биомассу).

$$NDVI = \frac{NIR - R}{NIR + R}$$

где NIR и R – значения коэффициента отражения земной поверхности в ближнем ИК и красном диапазонах спектра, центральная длина волны, соответственно, 835.1 мкм (S2A) и 833 мкм (S2B) (канал 8) и 664.5 мкм (S2A) и 665 мкм (S2B) (канал 4), ПР=10 м. NDVI меняется в диапазоне от -1 до 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% [14].

На рисунке 4 (а) показаны графики изменения NDVI для исследуемых тестовых площадок с 2016 по 2019 годы. Значения NDVI за 2019 год неожиданно стали меньше, чем за 2018 год и даже за 2016 год для площадок №5, №10 и №12. Возможной причиной является ряд недостатков ВИ NDVI, приводящих к неопределенностям при его количественной оценке. В работе [15] среди таких недостатков отмечены следующие: нелинейность, влияние атмосферы (водяной пар и аэрозоли), насыщение при высокой биомассе, чувствительность к наличию облачности, влияние почвы, геометрии объекта, влияние спектральных эффектов (разные инструменты). Главным же ограничением NDVI и подобных ему индексов является то, что оптические сенсоры могут осуществлять мониторинг только очень тонкого слоя растительного покрова, и не могут давать информацию о древесной растительности.

Одной из модификаций NDVI для учета влияния атмосферы является атмосферно устойчивый ВИ ARVI (Atmospherically Resistant Vegetation Index) [16]:

$$ARVI = \frac{NIR - RB}{NIR + RB}$$

где  $RB=R-\gamma(B-R)$ , B- значение коэффициента отражения в синем диапазоне спектра. Этот индекс заменяет красный канал в NDVI комбинацией красного и синего каналов. Эта комбинация обладает самокорректирующими свойствами для атмосферных эффектов. Вариации ARVI при вариациях непрозрачности атмосферы значительно меньше, чем вариации NDVI. Оптимальным значением коэффициента  $\gamma$ , зависящим от типа аэрозоля, является  $\gamma=1$  [16]. ARVI в 4 раза менее чувствителен к атмосферным эффектам (аэрозолю), чем NDVI [14], причем динамический диапазон его такой же, как и у NDVI. Наибольший эффект использования ARVI, вместо NDVI, достигается для поверхностей с растительностью, нежели для почвы, и для размеров частиц в атмосфере от средних до малых, нежели для крупных частиц (морские аэрозоли или пыль). Следует отметить, что данный индекс был предложен для сенсора MODIS с каналами: синий ( $0.47\pm 0.01 \mu\text{m}$ ), красный ( $0.66\pm 0.025 \mu\text{m}$ ) и ближний ИК ( $0.865\pm 0.02 \mu\text{m}$ ). Имея для Sentinel 2 каналы с длинами волн весьма близкими к соответствующим значениям для MODIS, а, именно, синий с центральной длиной волны  $0.4966 \mu\text{m}$ - S2A и  $0.4921 \mu\text{m}$ - S2B, красный -  $0.6645$  и  $0.665 \mu\text{m}$  и ближний ИК -  $0.835$  и  $0.833 \mu\text{m}$ , можно использовать формулу ARVI, полученную для MODIS, и для S2. На рисунке 4 (б) приведены графики изменения ARVI для трех дат. Использование ВИ ARVI показало 1) увеличение биомассы за прошедшие после пожара годы практически для всех тестовых площадок, 2) увеличение порога насыщения.

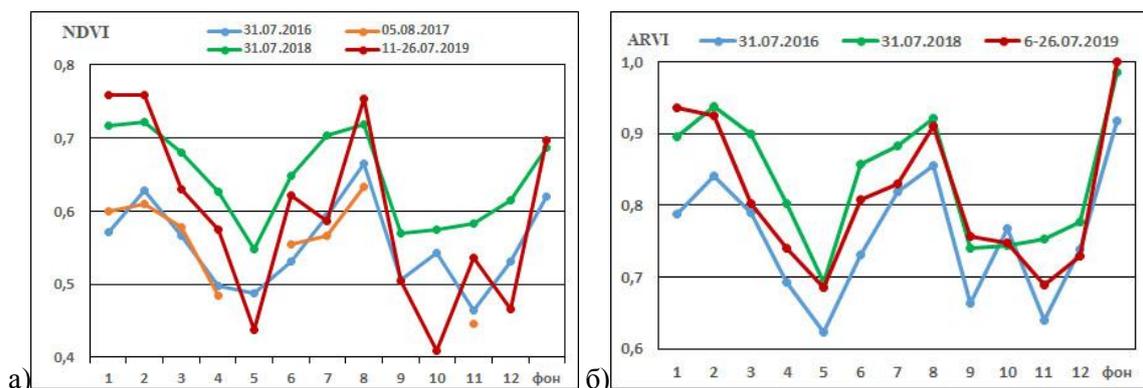


Рисунок 4. Изменение NDVI (а) и ARVI (б) для тестовых площадок за 2016-2019 годы.

### 3.2.2. NBR и NDMI

Нормализованный индекс гари NBR определяется по формуле [11]:

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

где SWIR2 – значение коэффициента отражения земной поверхности в среднем ИК канале, центральная длина волны 2202.4 мкм (S2A) и 2185.7 мкм (S2B) (канал 12, 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 растениях вне зависимости от структуры листа [17].

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

Стандартизованный индекс различий увлажненности (NDMI) чувствителен к уровню влажности в растительности. Используется для отслеживания засух, а также указывает уровень горючих материалов в пожароопасных зонах. Использует каналы NIR и SWIR1 для создания коэффициента, предназначенного для приглушения освещения и атмосферных эффектов.

$$NDMI = \frac{NIR - SWIR1}{NIR + SWIR1}$$

где SWIR1 - значение коэффициента отражения земной поверхности в среднем ИК канале, центральная длина волны 1613.7 мкм (S2A) и 1610.4 мкм (S2B) (канал 11, ПР=20 м).

На рисунке 5 (б) приведены графики изменения NDMI для рассматриваемых тестовых площадок за 2016-2019 годы. Графики на рисунках 5 (а) и (б) весьма близки по характеру изменений значений. Для всех тестовых площадок уровень влажности в растительности за 2016-2019 годы увеличился, причем менее всего для фоновой площадки.

Исходя из рассмотренных оптических вегетационных индексов NDVI, ARVI, NBR и NDMI можно сделать общий вывод о положительной динамике восстановления растительности после пожара 2015 года на 12 рассматриваемых площадках на территории Ивано-Арахлейского природного парка. А, именно, значения вегетационного индекса ARVI, показывающего относительную биомассу, за прошедшие после пожара годы увеличились для всех тестовых площадок, кроме площадки №10. Значения индексов NBR и NDMI, отражающих наличие влаги в растительности, увеличились за послепожарные годы для всех тестовых площадок.

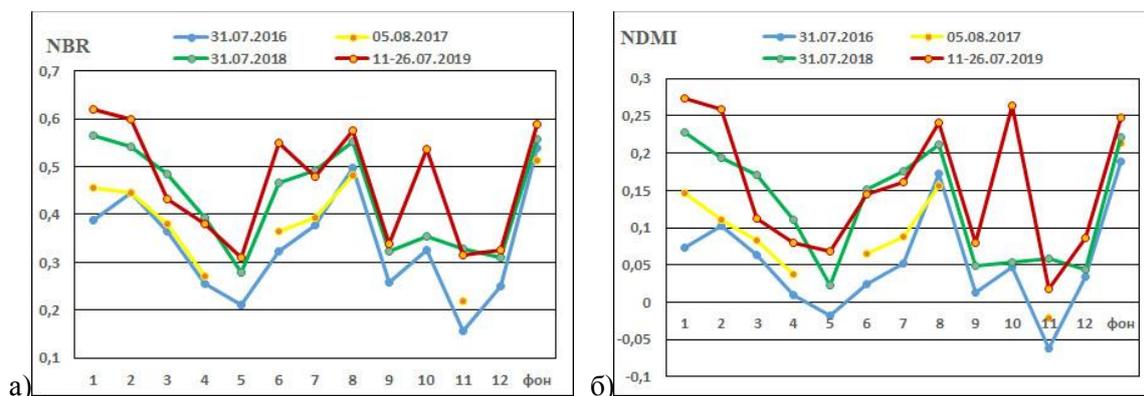


Рисунок 5. Графики изменения NBR и NDMI для тестовых площадок за 2016-2019 гг.

#### 4. 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 радарные (RVI) и оптические вегетационные индексы (NDVI, ARVI, NBR, NDMI) показали положительную динамику в состоянии растительности на 12 тестовых площадках за прошедшие после пожара годы. Лишь для площадки №10 значение ARVI за прошедшие после пожара годы уменьшилось.

#### 5. Благодарности

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

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.

#### 6. Литература

- [1] Shvetsov, E.G. Assessment of post-fire vegetation recovery in Southern Siberia using remote sensing observations / E.G. Shvetsov, E.A. Kukavskaya, L.V. Buryak, K. Barrett // *Environ. Res. Let.* – 2019. – Vol. 14. – P. 1-10. DOI: 10.1088/1748-9326/ab083d.
- [2] Горбунов, И.В. Послепожарное состояние древесной растительности на территории Ивано-Арахлейского природного парка (Забайкальский край) / И.В. Горбунов, В.П. Макаров, О.Ф. Малых // *Успехи современного естествознания.* – 2015. – № 7. – С. 54-59.
- [3] [Электронный ресурс]. – Режим доступа: <http://fires.kosmosnimki.ru/>.
- [4] Родионова, Н.В. Возможность обнаружения гарей по разновременным радарным изображениям SENTINEL 1 для районов юга Сибири в сезон весна-лето 2015/ Н.В. Родионова // *Современные проблемы ДЗЗ из космоса*. – 2016. – Т. 13, № 2. – С. 164-175.
- [5] [Электронный ресурс]. – Режим доступа: <https://sentinel.esa.int/web/sentinel/toolboxes/sentinel-1>.
- [6] Kim, Y. Vegetation effects on soil moisture estimation / Y. Kim, J. van Zyl // *Proc. IGARSS.* – Vol. 2. – P. 800-802.
- [7] Charbonneau, F. Use of dual polarization and multi-incidence SAR for soil permeability mapping / F. Charbonneau, M. Trudel, R. Fernandes // *Advanced Synthetic Aperture Radar (ASAR) – St-Hubert, Canada: 2005.*
- [8] Trudel, M. Using RADARSAT-2 polarimetric and ENVISAT-ASAR dual-polarization data for estimating soil moisture over agricultural fields / M. Trudel, F. Charbonneau, R. Leconte // *Can. J. Remote Sensing.* – 2012. – Vol. 38(4). – P. 514-527.
- [9] Kim, Y. A time-series approach to estimate soil moisture using polarimetric radar data / Y. Kim, J. van Zyl // *IEEE Trans. GRS.* – 2009. – Vol. 47(8). – P. 2519-2527.

- [10] Rouse, J.W. Monitoring vegetation systems in the Great Plains with ERTS / J.W. Rouse, R.H. Haas, J.A. Schell, D. W. Deering // Third ERTS Symposium. NASA SP-351 I. – 1973. – P. 309-317.
- [11] Key, C.H. Landscape assessment: ground measure of severity, the Composite Burn Index; and remote sensing of severity, the Normalized Burn Ratio / C.H. Key, N.C. Benson // 'FIREMON: Fire Effects Monitoring and Inventory System'. USDA Forest Service, Rocky Mountain Research Station, General Technical Report RMRS-GTR-164-CD: LA, 2005. – P. 1-15.
- [12] Wilson, E.H. Detection of forest harvest type using multiple dates of Landsat TM imagery / E.H. Wilson, S.A. Sader // Remote Sensing of Environment. – 2002. – Vol. 80. – P. 385-396.
- [13] Бондур, В.Г. Космический мониторинг воздействия природных пожаров на состояние различных типов растительного покрова в федеральных округах Российской Федерации / В.Г. Бондур, М.Н. Цидилина, Е.В. Черепанова // ИЗК. – 2019. – № 3. – С. 13-32.
- [14] Барталев, С.А. Исследование возможностей оценки состояния поврежденных пожарами лесов по данным многоспектральных спутниковых измерений / С.А. Барталев, В.А. Егоров, А.М. Крылов, Ф.В. Стыценко, Т.С. Ховратович // Современ. проблемы ДЗЗ из космоса. – 2010. – Т. 7. – С. 215-225.
- [15] Huete, A. Overview of the radiometric and biophysical performance of the modis vegetation indices / A. Huete, K. Didan, T. Miura // Remote Sens. Environ. – 2002. – Vol. 83(195). – P. 213-221.
- [16] Kaufman, Y.J. Atmospherically resistant vegetation index (ARVI) for EOS-MODIS / Y.J. Kaufman, D. Tanré // IEEE Trans. GRS. – 1992. – Vol. 30(2). – P. 261-270.
- [17] Ceccato, P. Detecting vegetation water content using reflectance in the optical domain / P. Ceccato, S. Flasse, S. Tarantola, S. Jacquemond, J. Gregoire // Remote Sensing of Environment. – 2001. – Vol. 77. – P. 22-33.

## **Assessment of vegetation state post-fire dynamics on the territory of Ivano-Arakhleisk natural Park (Zabaikalsky Krai) by Sentinel 1/2 radar and optical data**

**N.V. Rodionova<sup>1</sup>, I.L. Vakhmina<sup>2</sup>, T.V. Zhelibo<sup>2</sup>**

<sup>1</sup>Kotel'nikov FIRE RAS, Vvedenskiy sq. 1, Fryazino, Russia, 141190

<sup>2</sup>Institute of Natural Resources, Ecology and Cryology SB RAS, Nedorezova 16a, Chita, Russia, 672014

**Abstract.** The results of the analysis of a multi temporal data of satellite monitoring of the vegetation state in the territory of Ivano - Arakhleisky natural Park (Zabaikalsky Krai) after the fire of 2015 by radar data Sentinel 1 (S1) and optical data Sentinel 2 (S2) are given. To assess the dynamics of restoration of vegetation affected by natural fire, spectral vegetation indices (VI) NDVI, ARVI, NBR, NDMI and radar vegetation index RVI were used.