

**БЪЛГАРСКА АКАДЕМИЯ НА НАУКИТЕ**  
**ИНСТИТУТ ЗА КОСМИЧЕСКИ ИЗСЛЕДВАНИЯ И ТЕХНОЛОГИИ**  
**СЕКЦИЯ: “Аерокосмическа информация”**

**НАТАЛИЯ ХРИСТОВА СТАНКОВА**

**ИЗПОЛЗВАНЕ НА ДИСТАНЦИОННИ АЕРОКОСМИЧЕСКИ МЕТОДИ И ДАННИ**  
**ЗА ИЗСЛЕДВАНЕ НА ПОСЛЕДСТВИЯТА И СЪСТОЯНИЕТО**  
**НА ГОРСКИ ЕКОСИСТЕМИ СЛЕД ПОЖАР**

**А В Т О Р Е Ф Е Р А Т**

За получаване на образователна и научна степен

**„Доктор“**

В областта на висшето образование: 4. „Природни науки, математика и информатика“

Професионално направление 4.4. „Науки за Земята“

Научна специалност „Дистанционни изследвания на Земята и планетите“,

*Научен ръководител:*

**проф. д-р инж. Румен Недков**

София

2017

Дисертационният труд е обсъден на заседание на еднократно разширен научен семинар на секция „Аерокосмическа информация”, състоял се на 26.06.2017 г. и е предложен за разглеждане от научно жури.

Публичната защита на дисертационния труд ще се състои на открито заседание пред научното жури на .....2017 г. от ..... часа в заседателната зала на бл. 1 от научния комплекс на БАН, ул. „Академик Георги Бончев”.

Научно жури:

Външни членове:

1. проф. д-р Бойко Рангелов –МГУ „Св. Иван Рилски“

2. проф. д-р Никола Вичев – ИП „Н. Пушкиров“

3. доц. д-р Емилия Велизарова – ИГ-БАН

резервен член: проф. д-р Нели Христова – СУ „Св. Кл. Охридски“, ГГФ

Вътрешни членове:

1. проф. д-р Гаро Мардиросян – ИКИТ-БАН

2. проф. д-р Румен Недков – ИКИТ-БАН

резервен член: доц. д-р Георги Желев – ИКИТ-БАН

# СЪДЪРЖАНИЕ

Увод	4
ГЛАВА I. СЪВРЕМЕННО СЪСТОЯНИЕ НА ПРОБЛЕМА, СВЪРЗАН С ИЗСЛЕДВАНИЯТА НА ВЪЗСТАНОВИТЕЛНИТЕ ПРОЦЕСИ В ГОРСКИ ЕКОСИСТЕМИ СЛЕД ПОЖАР	4
1.1. Актуалност на проблема	4
1.2. Използване на дистанционни методи за изследване на възстановителните процеси след пожар	5
1.3. Цел и задачи	7
ГЛАВА II. МЕСТОПОЛОЖЕНИЕ И ОПИСАНИЕ НА ОБЕКТИТЕ НА ИЗСЛЕДВАНЕ	7
2.2. Местоположение и описание на пожара от периода 28/07/2007	7
2.3. Местоположение и описание на пожара от периода 27/08/2007	9
2.4. Местоположение и описание на пожара от периода 29/08/2007	10
ГЛАВА III. МЕТОДИКА ЗА ИЗСЛЕДВАНЕ НА ПРОЦЕСИТЕ НА ДЕГРАДАЦИЯ И СТЕПЕН НА ВЪЗСТАНОВЯВАНЕ НА ГОРСКИ ЕКОСИСТЕМИ СЛЕД ПОЖАР	12
3.1. Структура на методиката	12
3.2. Избор на показатели и индекси	12
3.3. Избор на метод и разработване на модел	13
3.4. Описание на модела за количествено определяне на посочния ъгъл, вектора на моментното състояние и nDI	13
3.5. Избор на тестови участъци и спътникови данни	16
ГЛАВА IV. АНАЛИЗ НА ПОЛУЧЕНИТЕ РЕЗУЛТАТИ	16
4.1. Анализ на резултатите от разработения модел за количествено определяне на посочния ъгъл, вектора на моментното състояние и DI	16
4.1.1. Анализ на DI за пожара 29/08/2007	16
4.1.2. Анализ на вектора на моментното състояние за пожара 29/08/2007	19
4.1.3. Анализ на посочния ъгъл за пожара 29/08/2007	21
4.2. Анализ на изследваните ВИ	23
4.2.1. Анализ на NDVI, VCI и NBR	23
4.2.2. Анализ на DI	24
4.2.3. Анализ на dNDVI	26
4.2.4. Анализ на dVCI	27
4.2.5. Анализ на dNBR	27
4.2.6. Анализ на dDI	29
4.3. Анализ на PVI	30
4.4. СПЕКТРАЛНИ ОТРАЖАТЕЛНИ ХАРАКТЕРИСТИКИ	31
4.5. Връзка на NDVI с климатичните параметри	32
ЗАКЛЮЧЕНИЕ	34
ПРИНОСИ НА ДИСЕРТАЦИОННИЯ ТРУД	35
ПУБЛИКАЦИИ НА АВТОРА, СВЪРЗАНИ С ДИСЕРТАЦИОННИЯ ТРУД	35
БИБЛИОГРАФИЯ	36

## Увод

Пожари възникват в много части на света, често незабелязани, освен ако нямат значително социално-икономическо или климатично въздействие. Обикновено се считат за опасност особено в населени райони, където могат да причинят загуба на живот и имущество и тежки икономически щети. Горските пожари са природни екосистемни процеси със значително въздействие върху околната среда. Признато е, че в днешно време потушаването им води до много по-голяма опасност, отколкото в миналото и до нарушаване на естествената сукцесия и хабитати в много области.

Горските пожари възникват в мащаби, вариращи от местен до регионален и трябва да бъдат наблюдавани и картографирани в световен мащаб. Дистанционните аеро- и космически методи са идеален инструмент, който играе важна роля в четири различни направления: прогнозиране, мониторинг, картографиране и регенерация на изгорелите площи. Мониторингът на възстановителните процеси на изгорелите райони е малко по-труден, отколкото идентифицирането им, главно поради по-малкия мащаб на възстановените участъци, в сравнение с общата площ, както и поради факта, че промяната в сигнатурата може да бъде едва забележима, особено в началните възстановителни етапи. Възстановяването в частично засегнати от пожар участъци може да бъде трудно забележимо.

Изследвания, свързани с последствията и възстановяването от пожари, са проведени от множество автори като основно в методологиите са използвани вегетационните индекси (ВИ). ВИ обикновено са безразмерни величини, получени чрез спътникови данни в различни спектрални диапазони, предимно използвани да покажат количеството на наличната зелена растителност. Поради този факт ВИ са се превърнали в основно средство за оценка и мониторинг на вегетационния статус.

Освен използваните ВИ за оценка на състоянието на екосистемата след пожар в настоящето изследване е използван метод на линейна спектрална трансформация с цел ортогонализация на спътниковите данни. На базата на трите основни компонента на Tasseled Cap трансформацията (ТСТ) са въведени две понятия – вектор на моментното състояние на екосистемата и посочен ъгъл. За мониторинг на възстановителните процеси след пожар в настоящата дисертация е разработен модел за количествена оценка на Disturbance Index (DI), вектора на моментното състояние на екосистемата и посочения ъгъл.

## ГЛАВА I. СЪВРЕМЕННО СЪСТОЯНИЕ НА ПРОБЛЕМА, СВЪРЗАН С ИЗСЛЕДВАНИЯТА НА ВЪЗСТАНОВИТЕЛНИТЕ ПРОЦЕСИ В ГОРСКИ ЕКОСИСТЕМИ СЛЕД ПОЖАР

### 1.1. АКТУАЛНОСТ НА ПРОБЛЕМА

Горските и полските пожари са все по-голям проблем за страните от ЕС, разположени в южните части на Европа. Статистики с развитието на горските и полски пожари през последните 25-30 години се публикуват в доклади на централите в ЕС, следящи състоянието на горите (JRS Technical Report, 2015). Наблюдения в страните-членки на ЕС през периода 1980 – 2005 година показват нарастване на броя на засегнатите от пожари площи (Добринкова, 2012). Предполага се, че една от основните причини за случващите се пожари са промените в климата.

Горските пожари ще продължат да представляват значителна заплаха за горите на страната. В исторически план, в края на XIX и началото на XX век са опожарявани средно по 3000 ha годишно, до средата на XX век – по 1600 – 1800 ha, а през 50-те до 80-те години – по 800 – 1000 ha. През последните 10 години проблемът доби кризисен характер, а за 1999 – 2001 г. положението може да се определи като катастрофално. Общо от 1991 до 2000 г. са опожарени 113.4 хил. ha горски площи (около 3.9% от горската площ на страната), като само за последната година са опожарени 57.4 хил. ha. За периода 2001 – 2008 г. са опожарени 86 хил. ha горски площи, като най-голяма е засегнатата площ през 2007 г., когато са опожарени 42.9 хил. ha (Национална стратегия за устойчиво развитие на горския сектор в България).

Едва през последните няколко години, когато последствията от горските пожари в някои райони на България достигнаха огромни размери, започнаха по-детайлни изследвания на тези проблеми (Йонов и др., 2000; Овчаров и Ташев, 2000; Власев и др., 2002; Петкова и др., 2003; Велизарова и др., 2002; Молла, 2014; Alexandrov et al., 2002; Molla et al., 2014; 2017; Мардиросян и др., 2011). Последствията от горските пожари са свързани с огромни за мащабите на Р. България опожарени площи за кратък период от време. Засегнати са над 1.9 млн. куб. м. дървесина, като екологичните последствия са многостранни (Ecorolis, bulletin 48, 2001): обезлесяване и ерозия на почвите, промяна на водния отток, нарушаване на топлинния и воден баланс на екосистемите, унищожаване на уникални находища на редки, защитени видове и ендемични видове, ограничаване на биологичното разнообразие, влошаване на санитарното състояние на горите, нарушаване на цикъла на CO<sub>2</sub> в природата.

Последствията от горски пожари продължават с десетилетия като в нашите климатични условия почти винаги водят до отрицателни последствия по отношение на продуктивността на екосистемите, включително на дървостойките (Ташев и др., 2003; Велизарова, 2014). Освен че увреждат екосистемите,

горските пожари създават условия, благоприятстващи появата на нови пожари (Johansson et al., 2012). Това се дължи на нарушаване на цялостта на гората, което от една страна води до нарушаване на микроклимата и намаляване на влагата, а от друга – позволява появата на тревни съобщества, лиани и храсти като по този начин се увеличава количеството на леките лесно запалими горими материали (Найденев, 2015).

## **1.2. ИЗПОЛЗВАНЕ НА ДИСТАНЦИОННИ МЕТОДИ ЗА ИЗСЛЕДВАНЕ НА ВЪЗСТАНОВИТЕЛНИТЕ ПРОЦЕСИ СЛЕД ПОЖАР**

Аерокосмическите дистанционни методи са високотехнологичен инструмент за надежден и мащабен мониторинг на възстановителните процеси, протичащи в горските екосистеми след пожар. Актуалността на изследването на последствията от горски пожари е обусловена от големите по мащаб и с дълготраен характер техни въздействия върху екологичната обстановка на огромни територии. За оперативно, надеждно и мащабно такова изследване дистанционните аерокосмически методи, технологии и средства са незаменими (Мардиросян, 2009).

Спътниковите данни се използват за откриване на активни пожари (Roy et al., 1999; Ichoku et al., 2003); картографиране интензитета на щетите и засегнатите от пожари площи в местен (Parsons, 2003; Holden et al., 2005; Filchev and Dimitrov, 2013), регионален (Eva and Lambin, 1998; Smith et al., 2002) и континентален (Scholes et al., 1996) мащаб; оценка на горивния материал (Means et al., 1999; Lefsky et al., 2002; Falkowski et al., 2005); наблюдение поведението на активни пожари (Kaufman et al., 1998; Wooster et al., 2003; Smith and Wooster, 2005); изследване на след пожарния ефект върху растителността (Turner et al., 1994; White et al., 1996; Diaz-Delgado et al., 2003; Мардиросян и Жеков, 2010; Molla and Velizarova, 2017) и идентифициране на облсти, в които естественото възстановяване може да бъде проблематично (Bobbe et al., 2001; Ruiz- Guillardo et al., 2004; Avetisyan, 2015).

Изследвания, свързани с последствията от пожари, са били проведени от множество автори с различни цели като използването на ВИ е основния фактор в техните методологии (Viedma et al., 1996). Мониторингът на възстановителните процеси е значително по-трудна задача, главно поради по-малкия мащаб на възстановените площи спрямо общата площ, а също и защото промяната в сигнатурата може да бъде едва доловима, особено в началните възстановителни етапи. Възстановяването в частично засегнати от пожар участъци може да бъде трудно забележимо (Jones and Vaughan, 2010).

Доказана е тясна връзка между ВИ и физиологичните параметри на растителността (Индекс на листната повърхност – LAI, биомаса, фотосинтезна активност, продуктивност и др.) (Huete, 1987; Seller, 1987; Baret and Guyot, 1991; Viedma, et al., 1996). Въпреки че LAI е основният морфологичен параметър на растителната покривка, свързан със спътниковите ВИ (Tucker and Sellers, 1986; Baret et al., 1989) измерването и оценката му са много сложни. Поради тази причина ВИ са подходящи показатели за наблюдение и оценка на растителното състояние.

Въпреки че е един от първите, NDVI (Normalized Difference Vegetation Index) (Rouse et al., 1973; Tucker, 1979) е един от най-често използваните ВИ за оценка на биомасата на зелената растителност, както и за дистанционна оценка на възстановителните процеси на растителността след пожар (Fiorella and Ripple, 1993; Henry and Hope, 1998; Diaz-Delgado et al., 2003). Изследване, проведено от Chèret and Denux (2007) установява, че измененията в стойностите на NDVI корелират с Индекса на засушаването De Marton (Martonne, 1926).

Тъй като повечето ВИ, в това число и NDVI, не са единни при високи стойности на LAI, както и при нулеви стойности за гола почва, често ВИ, в това число и NDVI се мащабират (Jones and Vaughan, 2010). При мащабиране на NDVI, се получава Vegetation Condition Index (VCI) (Kogan and Sullivan, 1993), който най-често се използва за откриване и оценка на засушаване. Ниските стойности на VCI са индикатор за малко или растителност, подложена на „стрес“ поради неблагоприятни климатични условия, а високите стойности на индекса показват наличие на здрава зелена растителност. Нормирането на базата на пикселите се извършва, с цел да намали ефекта от фалшиви или краткосрочни сигнали в данните и да се усилва дългосрочния екологичен сигнал (Wardlow et al., 2012). VCI дава количествена оценка за влиянието на метеорологичните условия върху растителността.

В алтернативен подход за корекция на линията на почвата е създаден Perpendicular Vegetation Index (PVI) (Richardson and Wiegand, 1977). PVI се интерпретира геометрично като перпендикулярното разстояние на измерена точка от линията на почвата. Перпендикулярното разстояние на измерването R/NIR от почвената линия не е линейно свързано с LAI.

Пораженията от пожари се оценяват значително по-често чрез индекса Normalized Burn Ratio (NBR) (Key and Benson, 1999; Miller et al., 2002), който използвайки близкия и средния инфрачервен канал е съставен така, че да е максимално чувствителен към цялостните промени в спектралните отражателни характеристики, причинени от пожар (Boer et al., 2008). NBR може да се използва за надеждна оценка на степента на нарушенията в различните участъци на пожаращето, като колкото по-

ниски са стойностите му, толкова по-големи са пораженията (Димитров и Гиков, 2009). Differenced Normalized Burn Ratio (dNBR) е резултат от разликите на NBR моделите преди и след пожара (Stabtree et al., 2009). NBR и dNBR са ключови индикатори за степента на изгаряне и могат да бъдат използвани за определяне на последствията след пожар, размера на пожара (Holden et al., 2005) и класификации за степента на изгаряне (Brewer et al., 2005; Smith et al., 2005).

Дистанционните методи имат голям потенциал за изучаване на хетерогенността в пожарните ефекти в достатъчно дребен мащаб за големи територии незабавно, по време на и след пожари. Оценките, получени чрез дистанционни методи за хетерогенността и пространственото разпределение на изгорелите учътъци, също са били използвани за изследване на причинно-следствените връзки (Rollins et al., 2001; Ruis-Galardo et al., 2004), за да се документира степента на възстановяване (Turner et al., 1994), да бъдат определени приоритетни области за намаляване на горивните материали (Hardy et al., 1998; Hardy et al., 1999) и възстановяване след пожар (Parsons, 2003). Наличието на области с подобна околна среда, поведение и въздействия след пожара са довели до използването на термина „severity classes” в рамките както на екологичната литература, така и в дистанционните изследвания (Ryan and Noste, 1985; DeBano et al., 1998; Diaz-Delgado et al., 2003). И все пак съществуват значителни вариации в т.нар. ниска (low), средна (moderate) и висока (high) степен на класификацията в зависимост от региона и видовете растителност.

Пожари с всякакви размери имат някои много локални въздействия, които биха могли да се класифицират като „high severity“ и хетерогенни мозайки от пожарни въздействия се наблюдават във всички пожари. Мащабът и хомогенността на въздействия от пожари са екологично важни. Често в по-големи пожари и големи петна в пожари преобладават компоненти с „high severity“ (Turner et al., 1994). Според Hudak et al. (2004) пожари с „high severity“ довеждат до пространствено по-хомогенни ефекти върху почвата и растителността, отколкото пожари с „moderate“ и особено „low severity“.

Предложеният от Kauth and Thomas (1976) модел за ортогонализация на спътникови изображения е много ефективен метод за интерпретиране, класификация и анализ на явления и процеси, свързани с динамиката на основните компоненти на земната повърхност – почва, растителност и вода. Този тип преобразуване се нарича Tasseled Cap трансформация (ТСТ) (Kauth and Thomas, 1976; Crist and Cicone, 1984). Използваният метод на линейна спектрална трансформация в многомерно пространство с цел намаляване на корелацията между отделните му елементи като се използват три компонента – почва, растителност и влажност – намира приложение и за оценка на състоянието на екосистемата преди и след пожар.

ТСТ е свързана с промяната на координатните оси в спектралното пространство от оригиналните в три некорелирани направления, като се запазва тяхната ортогоналност – Brightness (BR), Greenness (GR) и Wetness (W). Brightness компонентата представлява сума от всички канали, съответстваща на посоката на основното изменение на почвеното отражение. Greenness компонентата представлява контраста между инфрачервения и видимия канал, ортогонално на Brightness компонентата. Wetness компонентата се отнася за растителната и почвената влага, ортогонално на Greenness и Brightness компонентите (Chris and Kauth, 1986; Lillesand and Kiefer, 1987).

(Healey et al, 2005) изчислява DI в новото пространство, който е линейна комбинация от трите Tasseled Cap индекса. Изчисляването на DI се базира на наблюдението, че засегнатите от пожара горски насаждения обикновено се характеризират с по-високи стойности на Brightness компонентата и по-ниски стойности на Greenness и Wetness компонентите в сравнение с незасегнатите горски участъци (Healey et al, 2005). Следователно, засегнатите от пожара участъци имат високи положителни стойности на nBR и ниски отрицателни стойности на nGR и nW. Те показват високи стойности на DI. Обратно, незасегнатите участъци следва да представят ниски стойности на DI (Chen et al, 2014). DI показва количествено колко близко в Tasseled Cap пространство пиксел е до област в сцената, характеризиращи се с най-висок Brightness и най-нисък Greenness и Wetness компоненти. Разглеждани последователно DI изображенията осигуряват непосредствен начин за разпознаване на пикселите на засегнатата от пожара растителност, различаващи се от тези, характерни за нормалното състояние за горите.

### 1.3. ЦЕЛ И ЗАДАЧИ

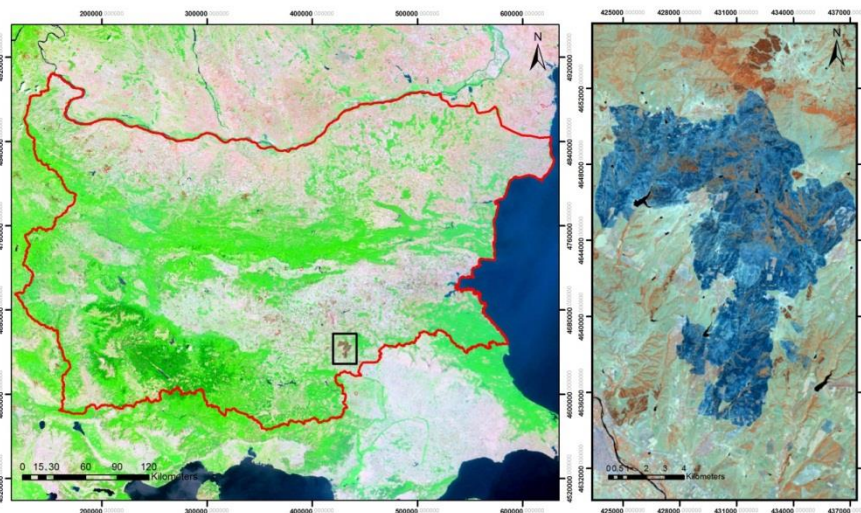
Основна цел на дисертацията е изследване на възможностите за използване на дистанционните аерокосмически методи за оценка на деградацията на горските екосистеми и степента на тяхното възстановяване след възникването на пожар. За постигане на поставената цел са решени следните задачи:

1. Избор на показатели и индекси за оценка на степента на деградация и възстановяване на горски екосистеми след пожар и изследване на динамиката и чувствителността им;
2. Моделиране на процесите на деградация и степен на възстановяване на горски екосистеми след пожар на базата на аерокосмически данни. Създаване на модел за количествена оценка;
3. Разработване на методика, включваща модел за изследване на процесите за деградация и степен на възстановяване на горски екосистеми след пожар;
4. Верификация на получените резултати от прилагане на методиката и модела за оценка;
5. Сравнителен анализ на получените резултати за оценка на възстановяване на горски екосистеми след пожар;

## ГЛАВА II. МЕСТОПОЛОЖЕНИЕ И ОПИСАНИЕ НА ОБЕКТИТЕ НА ИЗСЛЕДВАНЕ

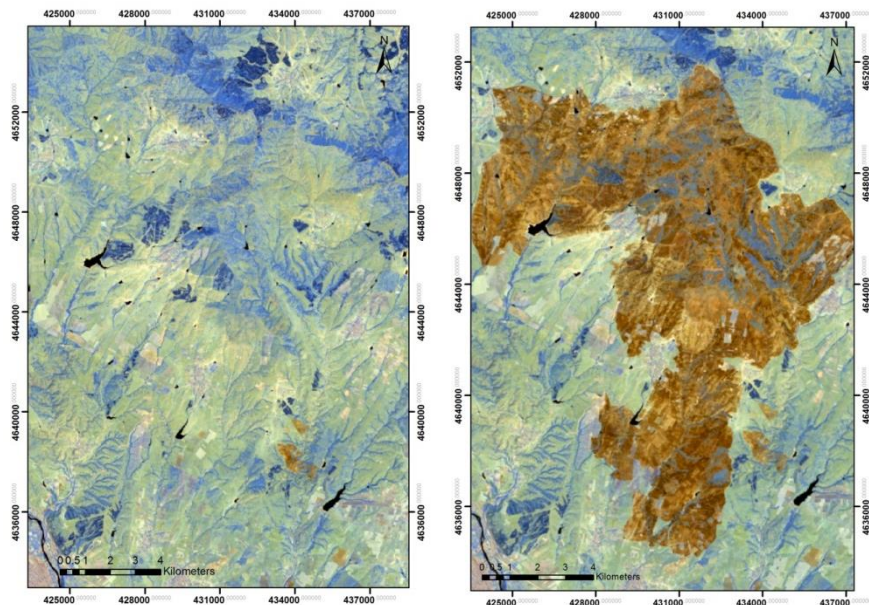
### 2.1. МЕСТОПОЛОЖЕНИЕ И ОПИСАНИЕ НА ПОЖАРА ОТ 28/07/2007

Изследваната територия на пожара от 28/07/2007 се намира в югоизточна България, област Хасково, северно от Свиленград, където през месец юли, 2007 г. избухва голям пожар (Фиг. 1).



**Фиг. 1. Местоположението на изгорялата площ на спътниково изображение от 25/07/2007г. от Terra MODIS, спектрални канали 7-2-1 (в ляво); Местоположението на изгорялата площ на спътниково изображение от 28/07/2007г. от Landsat TM, спектрални канали 4-5-7 (в дясно)**

Изгорялата площ попада на територията на общините Харманли и Любимец. Местоположението и площта на изгорялата територия са идентифицирани с помощта на две композитни изображения - от сензора Landsat ETM+ преди пожара (20/07/2007) и Landsat TM няколко дни след пожара (28/07/2007) (Фиг. 2).



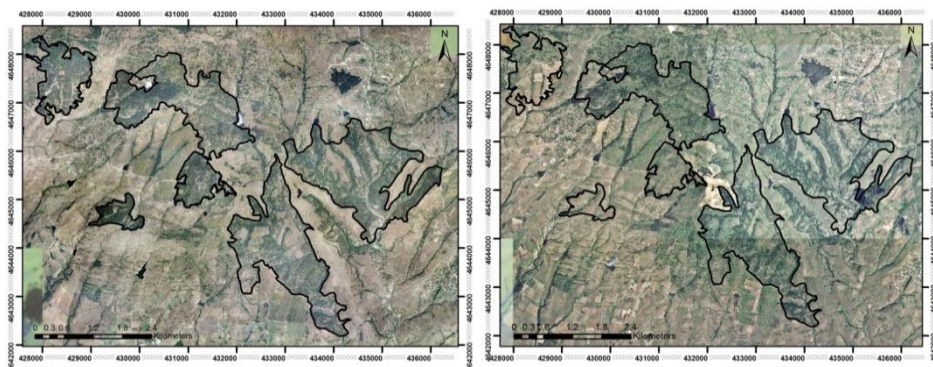
**Фиг. 2.** Спътниково изображение от 20/07/2007г. от Landsat ETM+, спектрални канали 7-5-4 (в ляво); Спътниково изображение от 28/07/2007г. от Landsat TM, спектрални канали 7-5-4 (в дясно)

Засегната е площ от 10989.8 ha. Координатите на пожара са N4651600m – E424000m и N4634000m – E438200m, UTM 35T. Разпространението на пожара е с обща дължина от 17.6 km и ширина – 14.2 km. Надморската височина за територията на пожара варира между 108 m и 627 m.

Пожарът попада на територията на защитена зона BG0000212 „Сакар“ по Директивата за местообитанията (Директива 92/43/ЕИО), а по Директивата за птиците (Директива 2009/147/ЕО) половината от изследваната област попада на територията на защитена зона BG0002021 „Сакар“.

Според картата на горите в България М 1:1 000 000, 1958 г. горите, които се намират на територията на изгорялата площ са издънкови дъбови гори (Карта на горите в България, 1958). Основната растителност на територията на пожара се състои от пасища, храсти, земеделски земи и гори. Горите са хетерогенни формации, съставени предимно от различни видове дъбове – цер (*Quercus cerris L.*), благун (*Quercus frainetto Ten.*), граница (*Querceta pubescentis Willd.*), виргилиев дъб (*Quercus virgiliana Ten.*). Други горски формации включват габърво-горунови гори (*Querceto-Carpineta betuli*) и келяв габър (*Carpinus orientalis Mill.*). Храстите се състоят основно от обикновена драка (*Paliurus spinachristi Mill.*) и храстовиден жасмин (*Jasminum fruticans L.*). Пасищата се състоят от ксеротермни тревни съобщества, доминирани от белизма (*Dichantieta ischaemi L.*), луковична ливадина (*Poaeta bulbosae L.*), ефемери (*Ephemereta*) (Бондев, 1991).

Чрез визуална интерпретация на аерофото изображения преди пожара от 2006 г. и след пожара от 2011 г. като тестови участъци са идентифицирани областите, заети от горски екосистеми преди пожара (Фиг. 3).

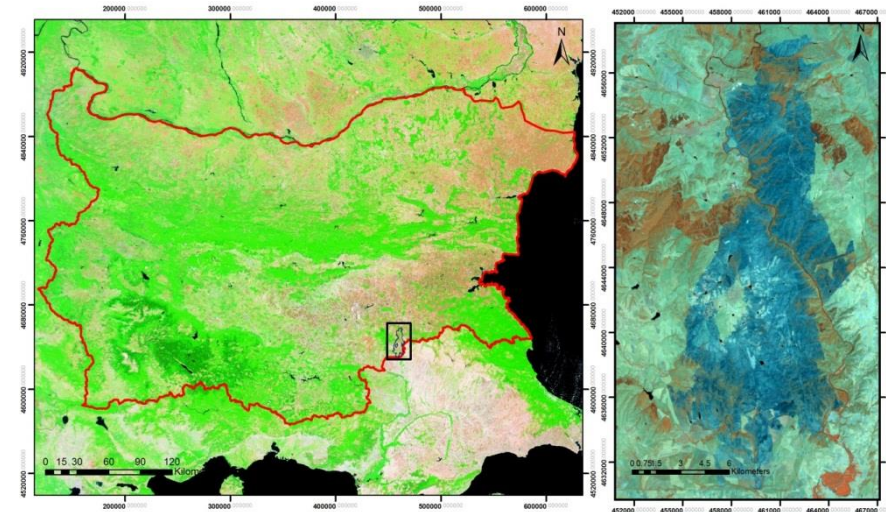


**Фиг. 3.** Аерофото изображения от 2006г. (в ляво) и 2011г. (в дясно) с тестовите участъци с горски екосистеми



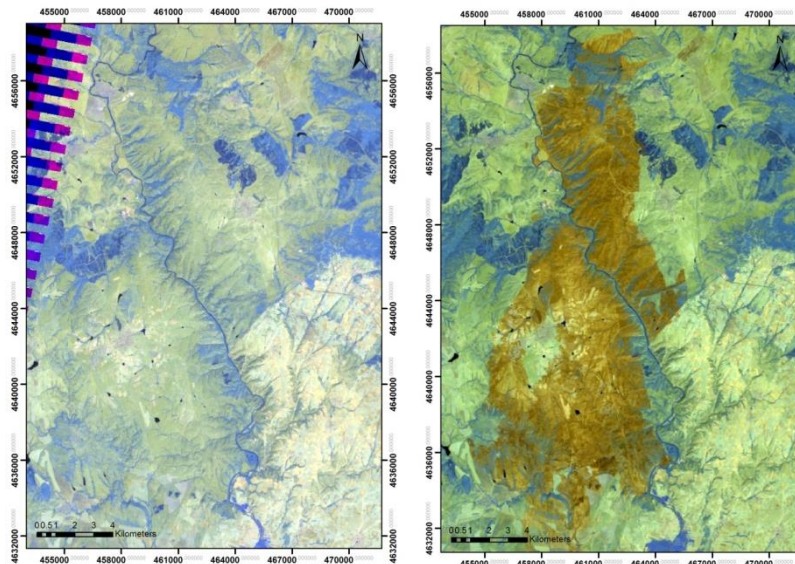
## 2.2. МЕСТОПОЛОЖЕНИЕ И ОПИСАНИЕ НА ПОЖАРА ОТ 27/08/2007

Изследваната територия на пожара от 27/08/2007 се намира в югоизточна България, на границата между областите Хасково и Ямбол, където през месец август, 2007 г. избухва голям пожар (Фиг. 4).



**Фиг. 4.** Местоположението на изгорялата площ на спътниково изображение от 21/08/2007г. от Terra MODIS, спектрални канали 7-2-1 (в ляво); Местоположението на изгорялата площ на спътниково изображение от 29/08/2007г. от Landsat TM, спектрални канали 4-5-7 (в дясно)

Изгорялата площ попада на територията на общините Свиленград, Тополовград и Елхово. Местоположението и площта на изгорялата територия са идентифицирани с помощта на две композитни изображения от сензора Landsat TM - преди пожара (22/08/2007) и няколко дни след пожара (29/08/2007) (Фиг. 5).



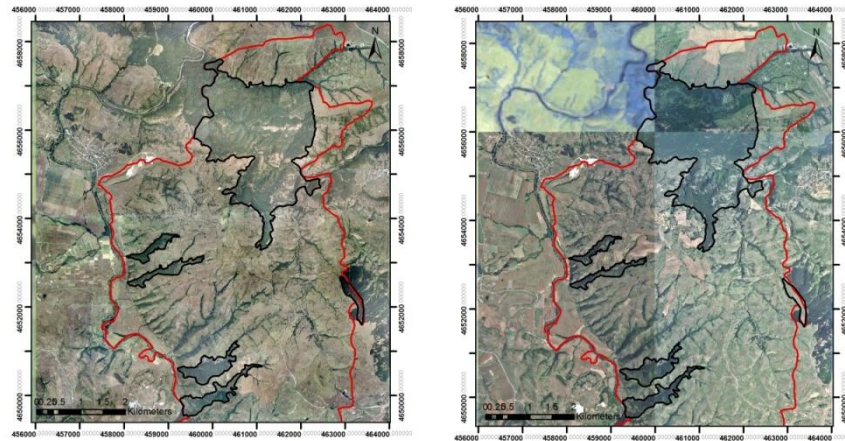
**Фиг. 5.** Спътниково изображение от 22/08/2007г. от Landsat TM, спектрални канали 7-5-4 (в ляво); Спътниково изображение от 29/08/2007г. от Landsat TM, спектрални канали 7-5-4 (в дясно)

Координатите на пожара са N4658400m – E462600m и N4630000m – E459500m, UTM 35T. Засегната е площ от 15798 ha. Разпространението на пожара е с обща дължина от 28.4 km и ширина – 10 km.

Според Директивата за местообитанията (Директива 92/43/ЕИО) пожарът попада на територията на няколко защитени зони – BG0000212 „Сакар“, BG0000217 „Ждрелото на река Тунджа“ и BG0000218 „Дервентски възвишения 1“. Според Директивата за птиците (Директива 2009/147/ЕО) изследваната област попада на територията на защитена зона BG0002021 „Сакар“.

Основната растителност на територията на пожара се състои от пасища, земеделски земи, храсти и гори. Според картата на горите в България М 1:1 000 000, 1958 г. горите, намиращи се на територията на изгорялата площ са издънкови дъбови гори (Карта на горите в България, 1958). Според (Бондев, 1991) преобладават смесени гори от различни видове дъбове – цер (*Quercus cerris L.*), благун (*Quercus frainetto Ten.*), граница (*Querceta pubescentis Willd.*), виргилиев дъб (*Quercus virgiliana Ten.*). Среща се и келяв габър (*Carpinus orientalis Mill.*). Храстите се състоят основно от обикновена драка (*Paliurus spina-christi Mill.*) и храстовиден жасмин (*Jasminum fruticans L.*). Пасищата се състоят от ксеротермни тревни формации, доминирани от белизма (*Dichantia ischaemi L.*), луковична ливадина (*Poaeta bulbosae L.*), ефемери (*Ephemereta*) (Бондев, 1991).

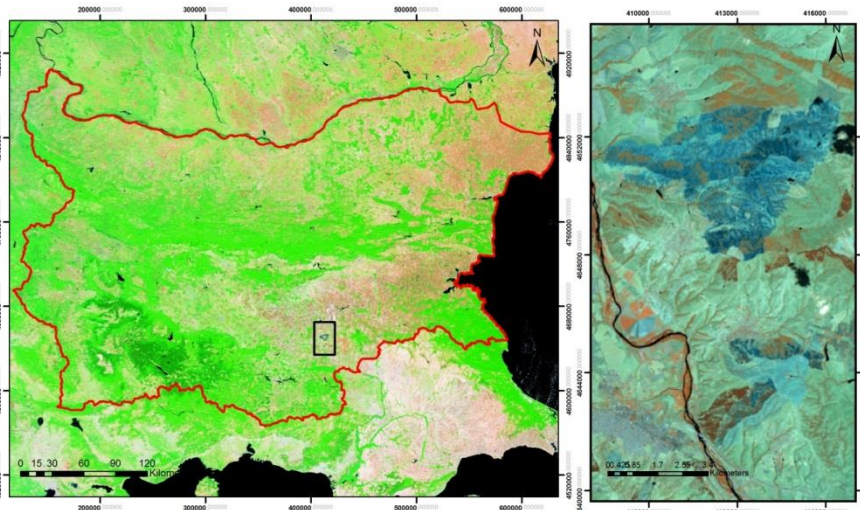
Чрез визуална интерпретация на аерофото изображения на територията на пожара от 2006 г. (преди пожара) и 2011 г. (след пожара) като тестови участъци са идентифицирани областите, заети от горски екосистеми (Фиг. 6).



**Фиг. 6.** Аерофото изображения от 2006г. (в ляво) и 2011г. (в дясно) с тестовите участъци с горски екосистеми и вектора на пожара (в червено), обхващащ половината от засегнатата от пожара територия

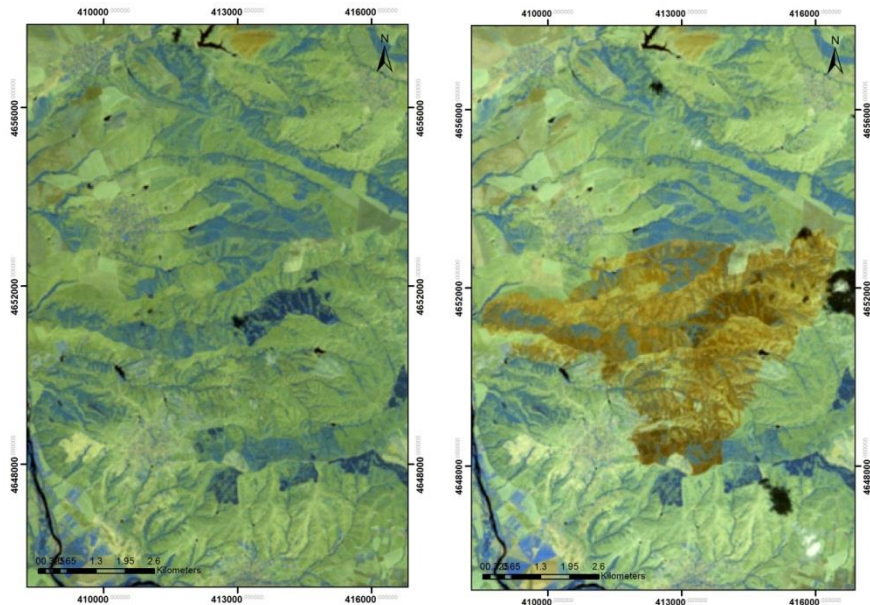
### 2.3. МЕСТОПОЛОЖЕНИЕ И ОПИСАНИЕ НА ПОЖАРА ОТ 29/08/2007

През месец август, 2007 г. в югоизточна България избухва още един голям пожар (Фиг. 7). Изследваната територия на пожара от 29/08/2007 се намира на територията на област Хасково, на границата между общините Харманли и Симеоновград.



**Фиг. 7.** Местоположението на изгорялата площ на спътниково изображение от 21/08/2007г. от Terra MODIS, спектрални канали 7-2-1 (в ляво); Местоположението на изгорялата площ на спътниково изображение от 29/08/2007г. от Landsat TM, спектрални канали 4-5-7 (в дясно)

Местоположението и площта на изгорялата територия са идентифицирани с помощта на две композитни изображения от сензора Landsat TM – преди пожара (13/08/2007) и след пожара (29/08/2007) (Фиг. 8).



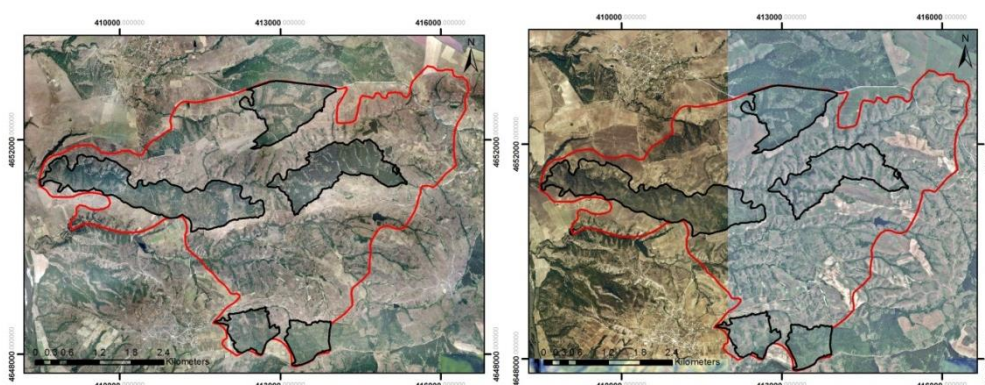
**Фиг. 8.** Спътниково изображение от 13/08/2007г. от Landsat TM, спектрални канали 7-5-4 (в ляво); Спътниково изображение от 29/08/2007г. от Landsat TM, спектрални канали 7-5-4 (в дясно)

Координатите на пожара са N4653400m – E415715m и N4647760m – E413275m, UTM 35T. Засегнатата площ е 2217 ha като разпространението на пожара е с обща дължина от 7.6 km и ширина – 5.5 km.

Пожарът не попада на територията на защитени зони от Европейската екологична мрежа Натура 2000 (Натура 2000). Намира се в близост до защитените зони BG0000578 „Река Марица“ и BG0000425 „Река Съзлийка“ според Директивата за местообитанията (Директива 92/43/ЕИО).

Основната растителност на територията на пожара се състои от пасища, храсти, земеделски земи и гори. Според картата на горите в България М 1:1 000 000, 1958 г. на територията на изгорялата площ се намират издънкови дъбови гори (Карта на горите в България, 1958). Според (Бондев, 1991) преобладават смесени гори от различни видове дъбове - цер (*Quercus cerris L.*), граница (*Quercus pubescens Willd.*), благун (*Quercus frainetto Ten.*), виргилиев дъб (*Quercus virgiliana Ten.*). Пасищата се състоят от ксеротермни тревни формации, доминирани от белизма (*Dichantia ischaemi L.*), луковична ливадина (*Poaeta bulbosae L.*), ефемери (*Ephemereta*). Храстите се състоят основно от обикновена драка (*Paliurus spina-christi Mill.*) и храстовиден жасмин (*Jasminum fruticans L.*) (Bondev, 1991).

Чрез визуална интерпретация на аерофото изображения на територията на пожара от 2006 г. (преди пожара) и 2011 г. (след пожара) като тестови участъци са идентифицирани областите, заети от горски екосистеми преди пожара (Фиг. 9).



**Фиг. 9.** Аерофото изображения от 2006г. (в ляво) и 2011г. (в дясно) с тестовите участъци с горски екосистеми и вектора на пожара (в червено)

## ГЛАВА III. МЕТОДИКА ЗА ИЗСЛЕДВАНЕ НА ПРОЦЕСИТЕ НА ДЕГРАДАЦИЯ И СТЕПЕН НА ВЪЗСТАНОВЯВАНЕ НА ГОРСКИ ЕКОСИСТЕМИ СЛЕД ПОЖАР

### 3.1. СТРУКТУРАТА НА МЕТОДИКАТА

Методиката на настоящето изследване включва следните етапи:

- избор на показатели и индекси и извършване на количествена и качествена оценка на динамиката на избраните показатели;
- избор на метод и разработване на модел за определяне на количествените параметри на процеса, свързан с възстановяване на екосистемата след пожар;
- верифициране и валидиране на модела на базата на определени тестови участъци;
- избор на спътникови данни като входни данни за функциониране на модела;
- сравнителен анализ на резултатите, получени от прилагане на модела и използваните ВИ;

### 3.2. ИЗБОР НА ПОКАЗАТЕЛИ И ИНДЕКСИ

При възникване на пожар, свързан с деструктивни въздействия върху горските екосистеми в качеството на показатели за оценка на резултатите са избрани следните:

- степен на увреждане на горската екосистема от пожара – свързан е с оценка на степента на засегнатост по отношение на екологичните промени, настъпващи в екосистеми след пожар;
- степен на възстановяване в определен времеви интервал на уврежданията от деструктивните въздействия – свързан е с възможността на възстановяване на горските екосистеми за определен времеви интервал;

Наблюдението на спектралните промени, дължащи се на изгарянето, води до използването на различни спектрални индекси, които са комбинация от различни спектрални канали на сензора. В качеството на спектрални индекси за количествена оценка са избрани посочените в Табл. 1 индекси.

**Табл. 1. Използвани спектрални индекси**

Спектрален индекс	Абривиатура	Формула	References
Normalized Difference Vegetation Index	NDVI	$\frac{\rho_{NIR} - \rho_{RED}}{\rho_{NIR} + \rho_{RED}}$	Rouse et al. (1973)
Vegetation Condition Index	VCI	$\frac{NDVI - NDVI_{min}}{NDVI_{max} - NDVI_{min}}$	Kogan and Sullivan (1993)
Perpendicular Vegetation Index	PVI	$\sqrt{\left(\rho_{\frac{soil}{RED}} - \rho_{\frac{veg}{RED}}\right)^2 + \left(\rho_{\frac{soil}{NIR}} - \rho_{\frac{veg}{NIR}}\right)^2}$	Richardson and Wiegand (1977)
Normalized Burn Ratio	NBR	$\frac{\rho_{NIR} - \rho_{SWIR}}{\rho_{NIR} + \rho_{SWIR}}$	Key and Benson (1999)
Kauth-Thomas Transformation	TCT	Brightness, Greenness, Wetness	Kauth and Thomas (1976); Crist and Cicone (1984)
Disturbance Index	DI	$nBR - (nGR + nW)$	Healey et al. (2005)

### 3.3. ИЗБОР НА МЕТОД И РАЗРАБОТВАНЕ НА МОДЕЛ

За изследването на растителността се използват многоспектрални спътникови данни, при които е налична корелация в отделните спектрални канали. В този случай, възникват определени трудности при класифициране на отделни елементи с различна степен на увреждане в следствие на пожара. При изследване на процеса на възстановяване на екосистемата от съществено значение е количественото определяне на степента на изменение на отделните елементи с различна степен на увреждане.

Целта на настоящата работа е изследване на възстановителните процеси, протичащи в екосистема след наличието на пожар. За постигане на целта се използва комплексен подход, за реализацията на който е разработен модел на базата на три компонента – DI, вектор на моментното състояние на екосистемата и посочен ъгъл.

За оценка на състоянието на екосистемата преди и след пожар е използван метод на линейна ортогонална трансформация в многомерно пространство с цел намаляване на корелацията между отделните му елементи като се използват три компонента – почва, растителност и влажност. Тези компоненти са ортогонални, следователно те са декорелирани. TCT представлява вид спектрална трансформация, която преобразува оригиналните силно корелирани данни в три некорелирани индекса – BR, GR и W. Този тип преобразуване не намалява броя на признаците в пространството на признаците, а повишава степента на тяхната идентификация при класификация на обектите от земното покритие.

На базата на получените компоненти – BR, GR и W – е предложен показател, описващ моментното състояние на екосистемата. Понеже се използват спътникови данни, които отразяват състоянието на екосистемата в определен момент от време, се въвежда понятието вектор на моментното състояние на екосистемата (Vector of Instantaneous Condition – VIC). Въведеният показател описва състоянието и връзката между трите основни компонента на изследваната екосистема, както и количествено отразява промяната в съотношението между компонентите в случай на отрицателно екологично въздействие (Станкова и Недков, 2015; Stankova and Nedkov, 2016).

Введена е количествена оценка, отразяваща отклонението между Greenness компонентата от TCT и вектора на моментното състояние, която е обозначена като посочен ъгъл (Direction Angle – DA). Измененията на стойностите на посочения ъгъл отразяват тенденцията на промяната на зелената компонента по отношение на вектора на състоянието, което служи за оценка степента на възстановяване на Greenness компонентата за различните моменти от изследвания период (Станкова и Недков, 2015; Stankova and Nedkov, 2016).

В новото пространство се изчислява DI (Healey et al, 2005), който е линейна комбинация от трите Tasseled Cap компонента. Разглеждани последователно стойностите на DI осигуряват непосредствен начин за количествено определяне на отклоненията, възникващи при деструктивни въздействия върху състоянието на горите.

За мониторинг на процесите, протичащи в екосистемата преди и възстановителните процеси след пожар е разработен модел за количествена оценка на DI, вектора на моментното състояние на екосистемата и посочения ъгъл (Фиг. 10).

### 3.4. ОПИСАНИЕ НА МОДЕЛА ЗА КОЛИЧЕСТВЕНО ОПРЕДЕЛЯНЕ НА ПОСОЧНИЯ ЪГЪЛ, ВЕКТОРА НА МОМЕНТНОТО СЪСТОЯНИЕ И NDI

След подбора на подходящи композитни изображения като входни данни за функциониране на модела, следва обособяване на засегнатите от пожарите области и определяне на тестови участъци с горски екосистеми за верифициране и валидиране на модела (Фиг. 3, Фиг. 6, Фиг. 9).

Първата стъпка от модела е прилагане на линейно ортогонално преобразуване върху входните композитни изображения. За различните Landsat сензори (Landsat TM, Landsat ETM+ и Landsat OLI) са използвани различни трансформационни матрици, затова моделите са три. На Фиг. 10 е показан модела, използващ като входни данни композитни изображения от сензора Landsat TM. Като резултат се получават Tasseled Cap трансформирани композитни изображения, съдържащи три слоя – W, BR и GR.

Втората стъпка от модела е декомпозиция на всеки един от трите основни Tasseled Cap компонента – W, BR и GR (Фиг. 10).

Третата стъпка е изчисляване на средните стойности и стандартните отклонения за всеки един от Tasseled Cap компонентите. Следва пресмятане на нормираните стойности на компонентите. Тези стъпки се извършват с цел нормиране на получените стойности. Нормирането се извършва по следните формули:

$$nW = (W - E\{W\})/St.Dev(W) \quad (1)$$

$$nBR = (BR - E\{BR\})/St.Dev(BR) \quad (2)$$

$$nGR = (GR - E\{GR\})/St.Dev(GR) \quad (3)$$

където  $E\{W\}$ ,  $E\{BR\}$  и  $E\{GR\}$  са съответно средните стойности на Tasseled Cap компонентите – BR, GR и W.

St.Dev (W), St.Dev (BR) и St.Dev (GR) са съответните стандартни отклонения на компонентите.

Следователно  $nW$ ,  $nBR$  и  $nGR$  са нормираните стойности на W, BR и GR.

След нормирането на трите Tasseled Cap компонента се изчислява DI по формулата:

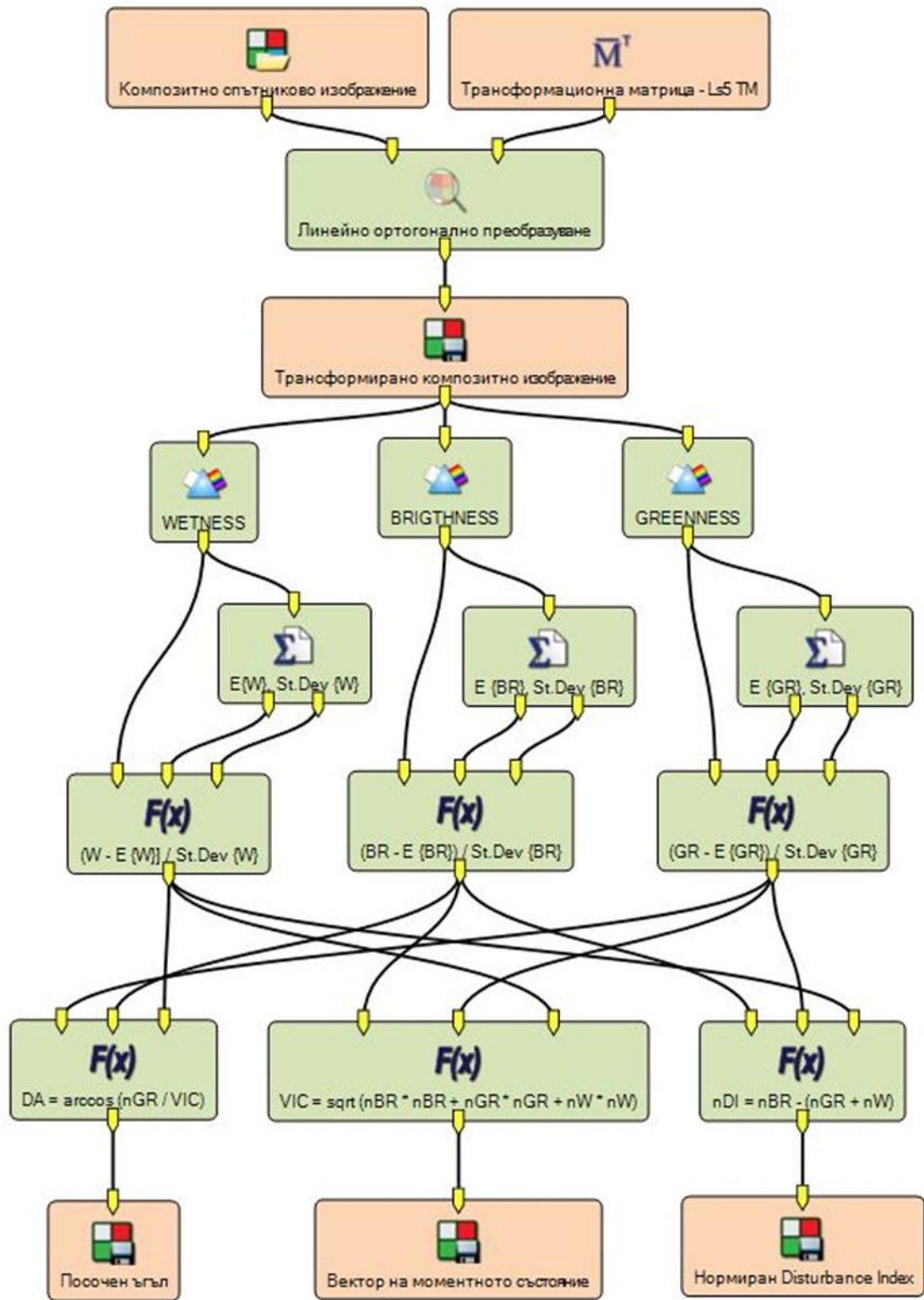
$$DI = nBR - (nGR + nW) \quad (4)$$

Следващата стъпка е изчисляване на вектора на моментното състояние на екосистемата (VIC) на базата на нормираните стойности на Tasseled Cap компонентите:

$$VIC = \sqrt{nBR^2 + nGR^2 + nW^2} \quad (5)$$

Последната стъпка е изчисляване на посочния ъгъл (DA) – ъгъла на отклонение между зелената компонента от TCT и вектора на моментното състояние:

$$DA = \arccos(nGR/VIC) \quad (6)$$



Фиг. 10. Модел за количествено определяне на посочния ъгъл, вектора на моментното състояние и nDI, използващ като входни данни композитни изображения от сензора Landsat TM

### 3.5. ИЗБОР НА ТЕСТОВИ УЧАСТЪЦИ И СПЪТНИКОВИ ДАННИ

Верификацията и валидацията на предложените модели е извършена на базата на предварително избрани тестови участъци с горски екосистеми от територията на пожарите. Селекцията е извършена посредством визуална интерпретация и фоторевизия на базата на аерофото изображения от 2006 г. и 2011 г.

За целта на настоящото изследване са използвани изображения от спътниците Landsat 5 TM, Landsat 7 ETM+, Landsat 8 OLI и Terra MODIS.

Подбраните изображения са заснети веднъж годишно по време на вегетационния период като се вземат предвид дните с отсъствие на облачна покривка над изследваните територии. Изследван е период от 9 години след настъпване на пожарите (2007 – 2016 год.).

Използвани са спътникови изображения от сензорите Landsat 5 TM, Landsat 7 ETM+ и Landsat 8 OLI от USGS-EROS (earthexplorer.usgs.gov). Датите на използваните спътникови изображения, както и сензора, от който са получени, са показани в Табл. 2.

**Табл. 2. Използвани спътникови изображения**

Дати	Сензор	Дати	Сензор
22/06/2007	Terra MODIS	02/08/2009	Landsat TM
20/07/2007	Landsat ETM+	21/06/2010	Terra MODIS
25/07/2007	Terra MODIS	13/08/2010	Landsat ETM+
28/07/2007	Landsat TM	22/06/2011	Terra MODIS
13/08/2007	Landsat TM	08/08/2011	Landsat TM
21/08/2007	Terra MODIS	21/06/2012	Terra MODIS
22/08/2007	Landsat TM	22/06/2013	Terra MODIS
29/08/2007	Landsat TM	13/08/2013	Landsat OLI
19/06/2008	Terra MODIS	16/08/2014	Landsat OLI
24/08/2008	Landsat TM	18/08/2015	Landsat OLI
25/08/2008	Landsat ETM+	05/08/2016	Landsat OLI
22/06/2009	Terra MODIS	21/08/2016	Landsat OLI

## ГЛАВА IV. АНАЛИЗ НА ПОЛУЧЕНИТЕ РЕЗУЛТАТИ

### 4.1. АНАЛИЗ НА РЕЗУЛТАТИТЕ ОТ РАЗРАБОТЕНИЯ МОДЕЛ ЗА КОЛИЧЕСТВЕНО ОПРЕДЕЛЯНЕ НА ПОСОЧНИЯ ЪГЪЛ, ВЕКТОРА НА МОМЕНТНОТО СЪСТОЯНИЕ И DI

#### 4.1.1. Анализ на DI за пожара от 29/08/2007

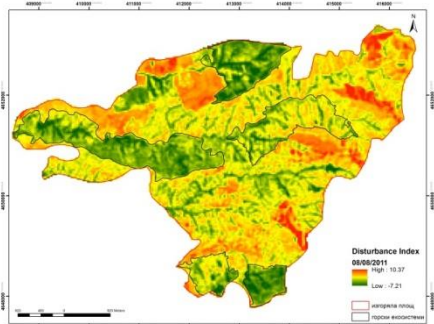
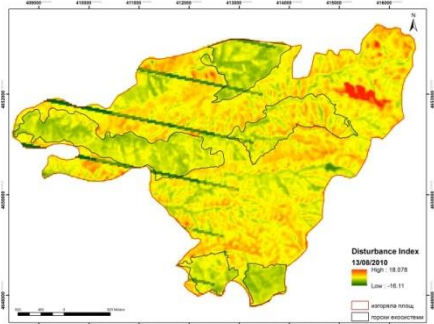
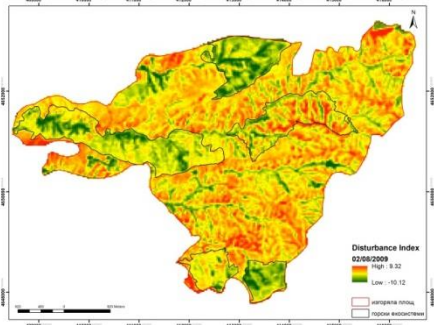
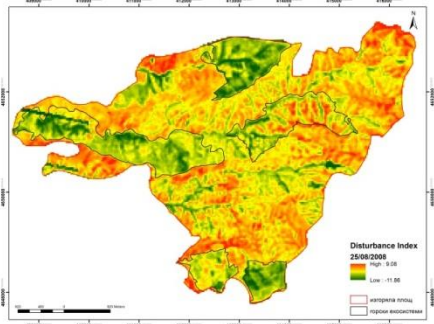
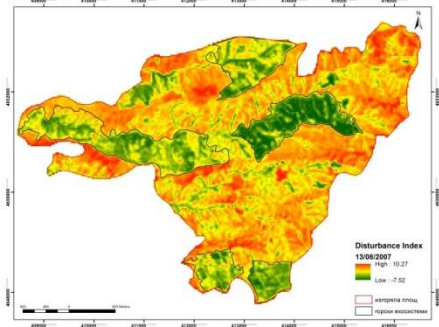
Изчисляването на DI се основава на наблюдението, че силно засегнатите от пожара райони обикновено се характеризират с по-високи стойности на Brightness Tasseled Cap компонентата, заради по-високото отражение и по-ниски стойности на Greenness и Wetness компонентите, заради наличието на по-малко растителност или липсата ѝ, по-ниска влажност, в сравнение с незасегнатите от пожара области. Следователно засегнатите от пожар горски екосистеми, които имат високи положителни стойности на nBR и ниски и/или отрицателни стойности на nGR и nW, се отличават с високи DI стойности. И обратно, незасегнатите от пожар горски екосистеми показват ниски стойности на DI.

Растрното изображение на Фиг. 11 а) (13/08/2007) много точно показва доброто вегетативно състояние на тестовите горски участъци преди пожара, отличаващи се с най-ниски стойности на DI. След наличието на пожара и негативното му влияние стойностите на DI на територията на горите рязко се повишават и обособяват засегнатите участъци. DI запазва високи стойности и през следващите години от мониторинга. Наличие на възстановителен процес настъпва след 2011 г. в част от изследваните тестови участъци като положителната тенденция продължава до края на изследвания период. По-силно засегнатите участъци от горските екосистеми запазват високи стойности на DI и възстановяването при тях е частично.

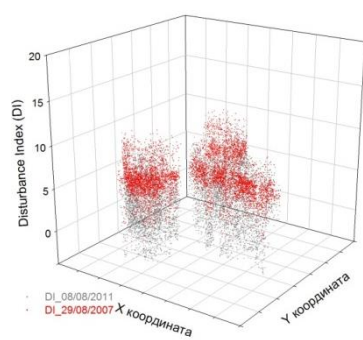
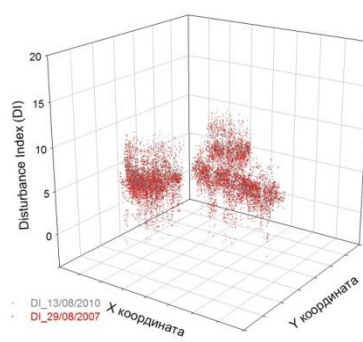
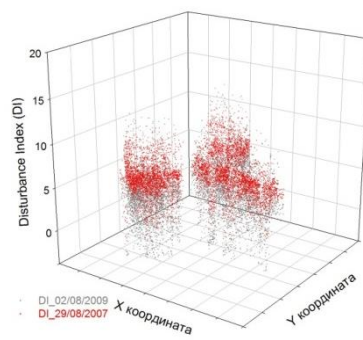
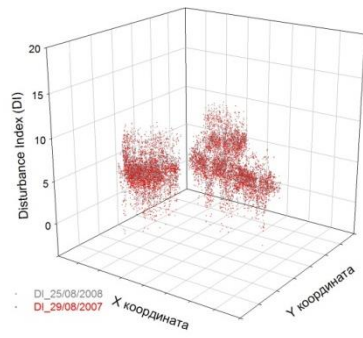
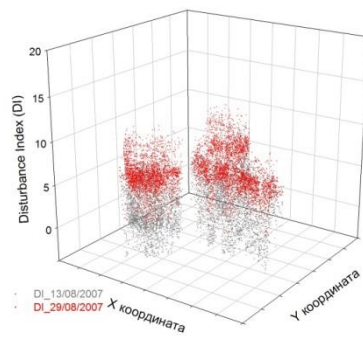
На Фиг. 11 б) 3D-разсейващите диаграми с DI стойностите също потвърждават началото на възстановителен процес през 2011г. с диференцирането на двата класа пожар/след пожар и по-ниските стойности на DI от датите след пожара. През първите години се наблюдава хомогенност в пространственото разпределение и невъзможност за диференциране на класовете. В края на изследвания период пространственото разпределение на DI стойностите наподобява това от преди пожара.

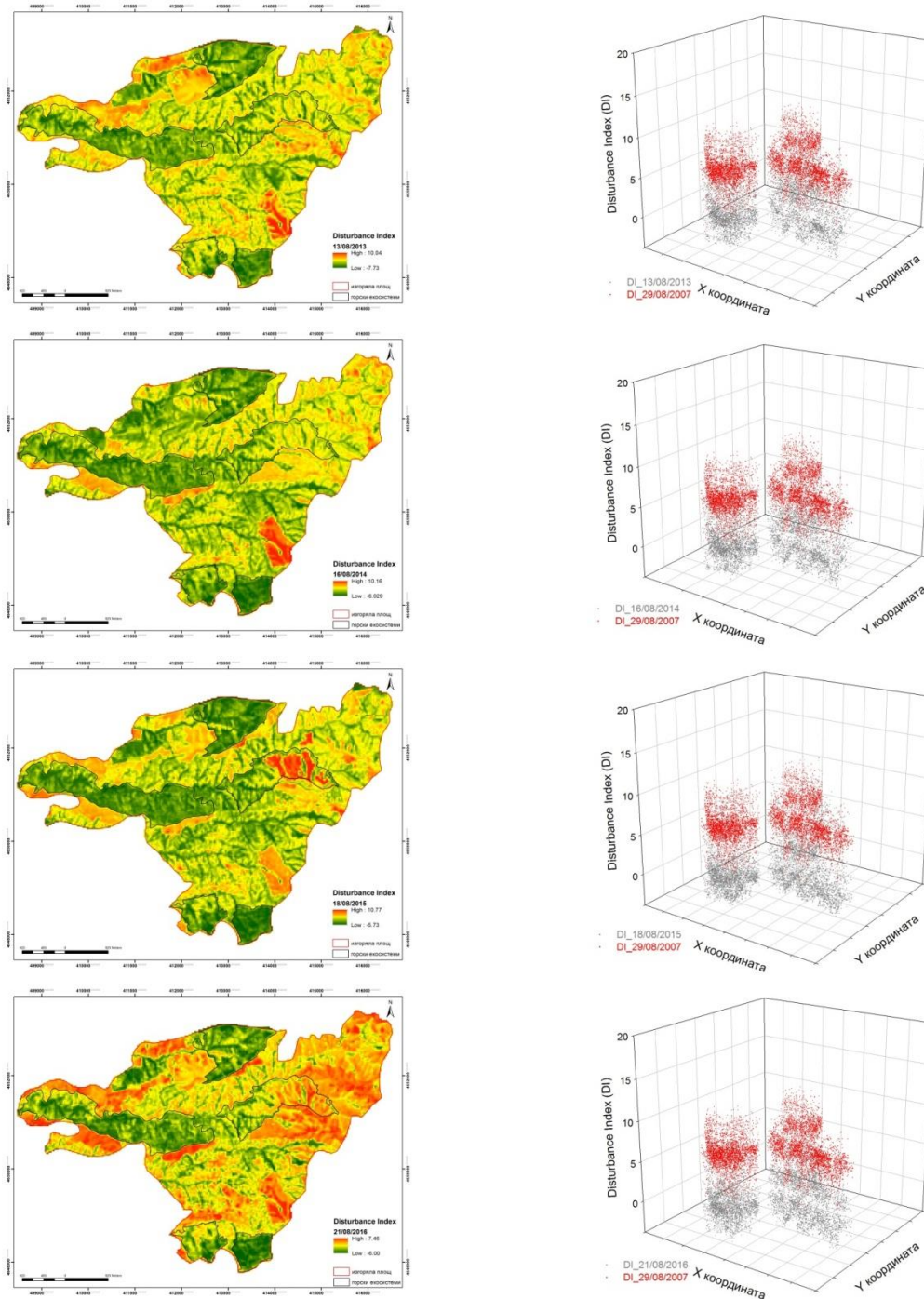


a)



б)





Фиг. 11.

а) Растерни изображения на DI за периода 2007 – 2016 г. на територията на изгорялата площ от пожара от 29/08/2007. Горските екосистеми са обособени с черен цвят;

б) Сравнителна характеристика на пространственото разпределение на DI на територията на горските екосистеми от пожара от 29/08/2007. Пространственото разпределение на DI е визуализирано за период от 10 г. – 2007 – 2016 г., като за всяка година DI е сравнен с DI от датата на пожара (29/08/2007) (с червен цвят)

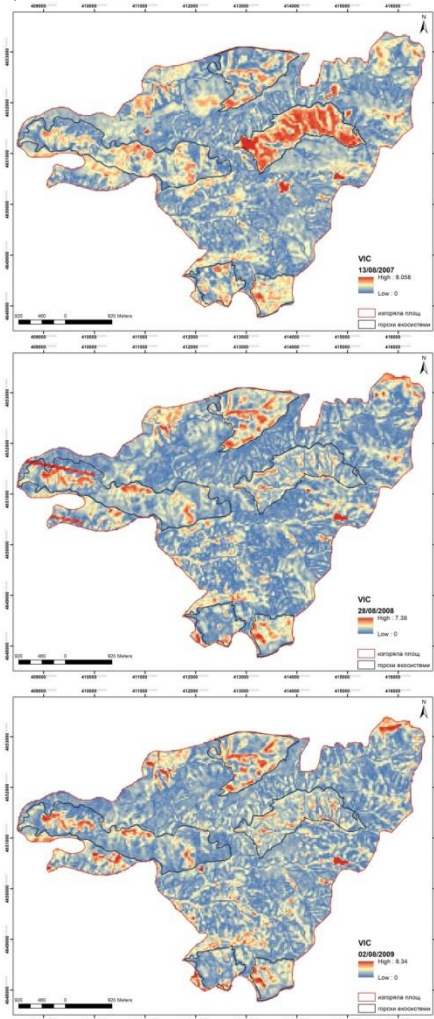
#### 4.1.2. Анализ на вектора на моментното състояние за пожара от 29/08/2007

На базата на Tasseled Cap компонентите – BR, GR и W – е въведено понятие, описващо моментното състояние на екосистемата – вектор на моментното състояние. Този вектор описва състоянието и връзката между трите основни компонента на изследваната екосистема, както и показва промяната в съотношението между компонентите в случай на пожар.

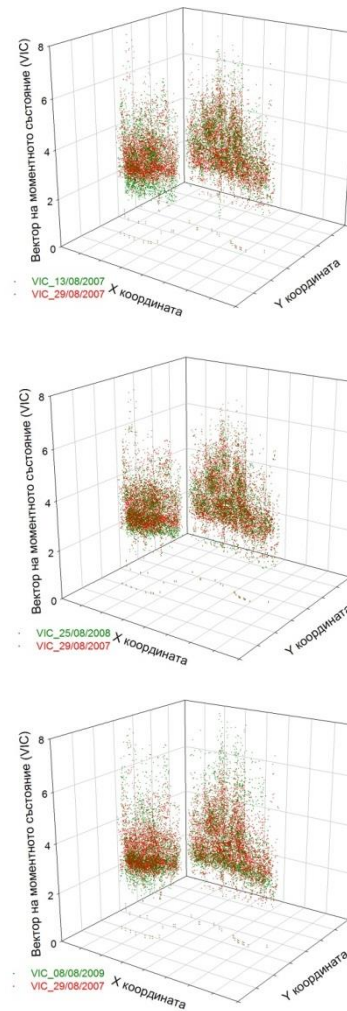
На Фиг. 12 а) растрните изображения на вектора на моментното състояние за третия изследван пожар се отличават с динамика на територията на пожара, което показва наличието на флуктуации в отделните Tasseled Cap компоненти. Тестовите горски масиви се отличават с високи стойности на VIC на изображението преди пожара (13/08/2007), а след пожара стойностите на индекса се понижават. В две по-силно засегнати от пожара гори възстановяването е частично и в края на изследвания период VIC стойностите остават занижени.

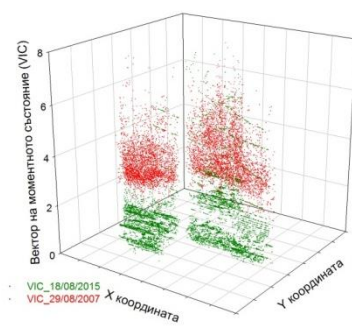
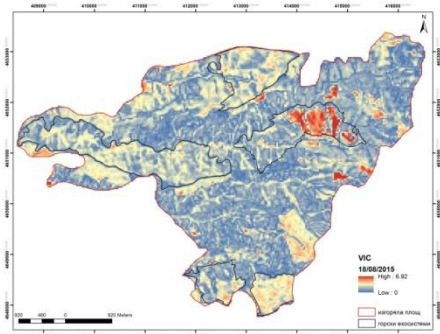
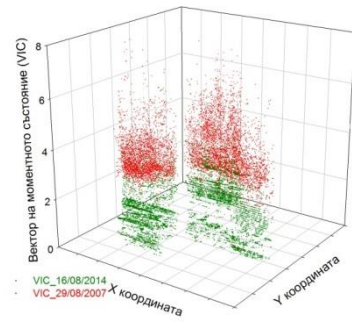
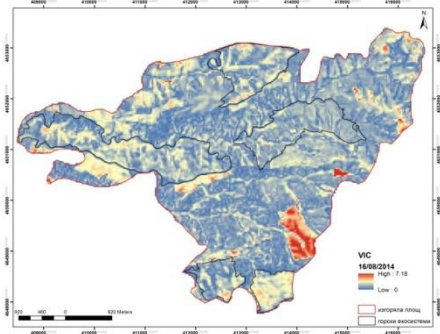
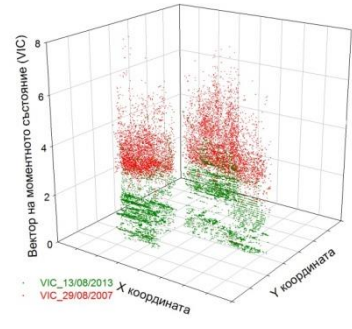
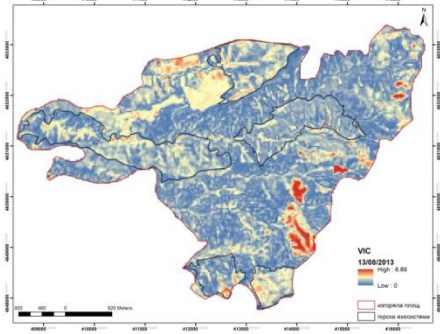
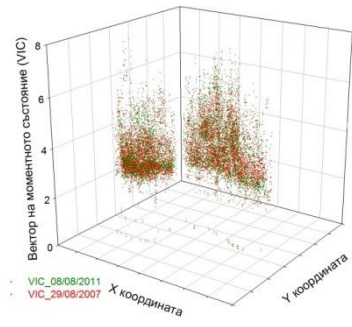
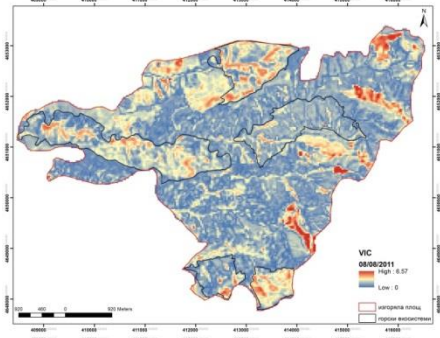
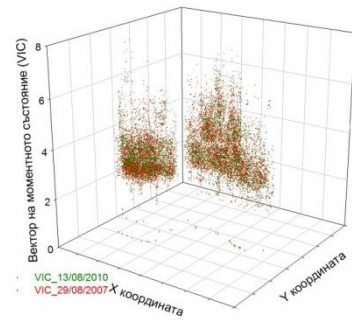
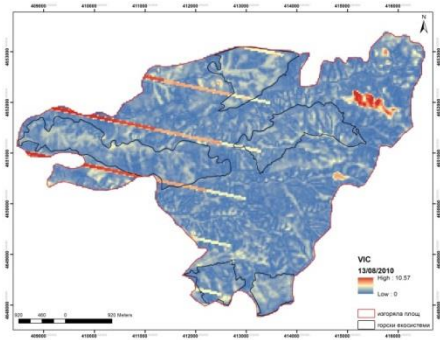
На 3D-диаграмите (Фиг. 12 б)) пространственото разпределение на стойностите на индекса се характеризират с хомогенен характер през първите години от изследвания период, а диференциране на двата отделни класа пожар/след пожар, което потвърждава начало на възстановителни процеси, показани на изображенията от 13/08/2013, 16/08/2014, 18/08/2015 и 21/08/2016.

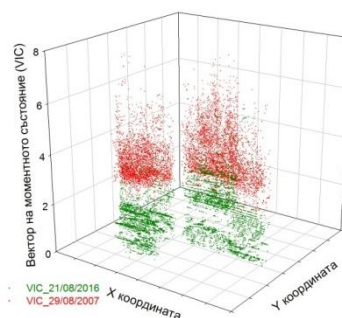
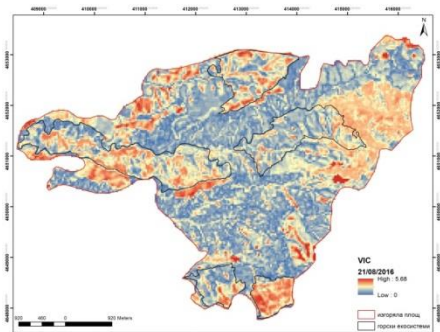
а)



б)







Фиг. 12.

а) Растерни изображения на VIC за периода 2007 – 2016 г. на територията на изгорялата площ от пожара от 29/08/2007. Горските екосистеми са обособени с черен цвят;

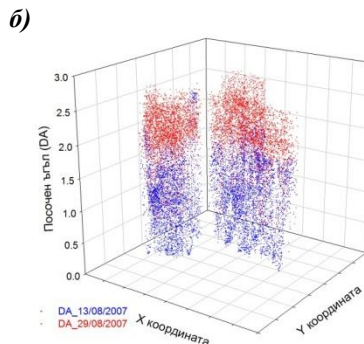
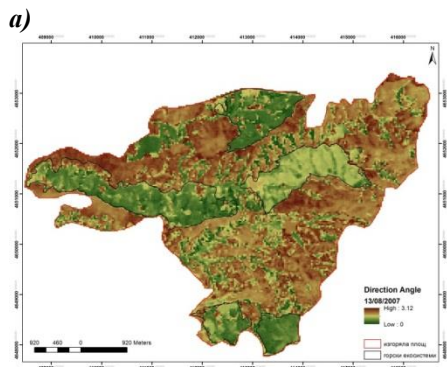
б) Пространствено разпределение на VIC за горските екосистеми на територията на пожара от 29/08/2007. Направена е сравнителна характеристика на VIC за период от 10 г. – от 2007 г. до 2016г., като на всяка фигура VIC от съответната дата е сравнен с VIC на пожара (29/08/2007) (с червен цвят)

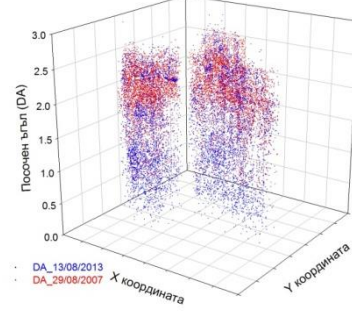
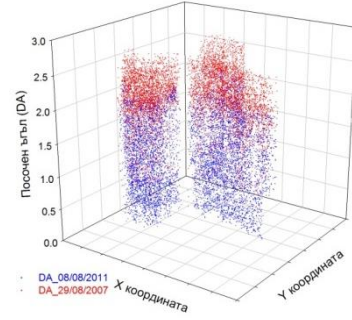
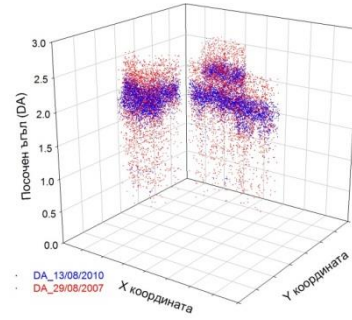
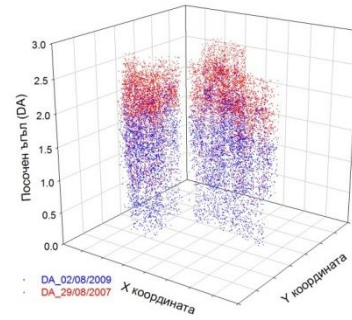
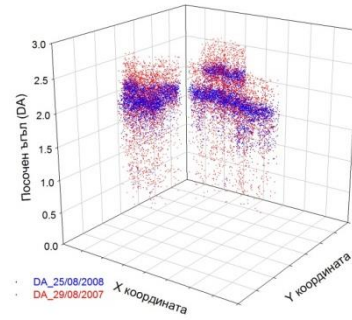
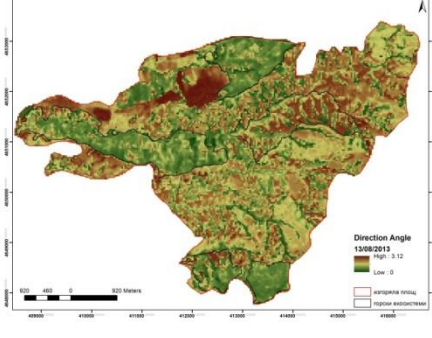
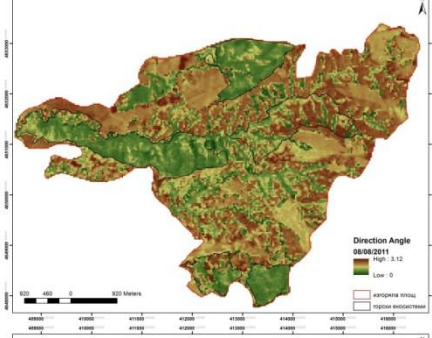
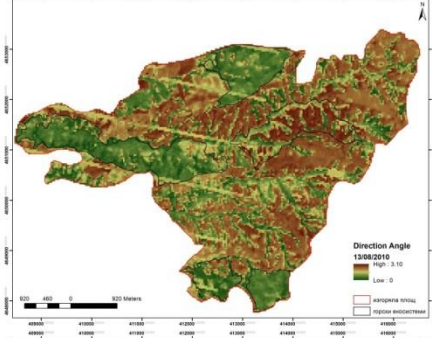
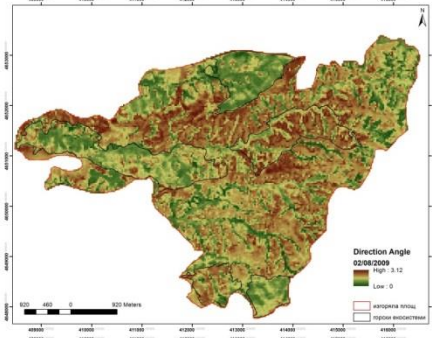
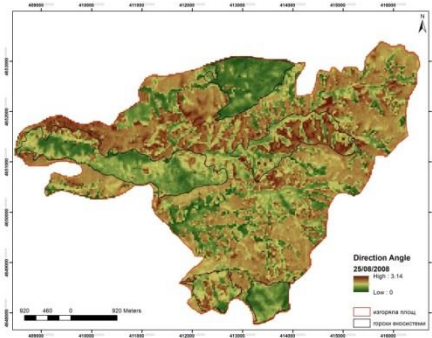
#### 4.1.3. Анализ на посочния ъгъл за пожара от 29/08/2007

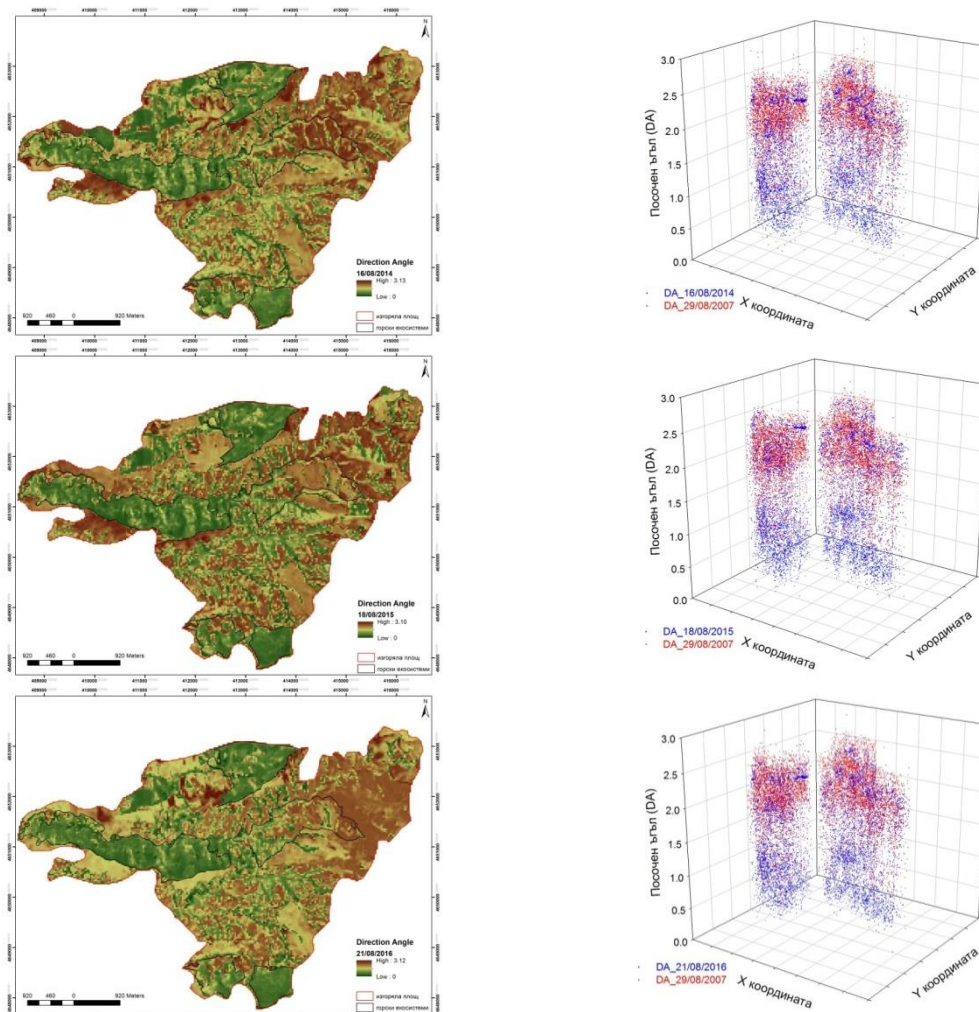
Изчислен е ъгълът на отклонение между Greenness компонентата от ТСТ и вектора на моментното състояние, за който е въведено понятието посочен ъгъл. Този индекс показва посоката на промяна на зелената компонента по отношение на вектора на състоянието, давайки възможност за оценка степента на възстановяване на Greenness компонентата за различните моменти от изследвания период. Като цяло посочния ъгъл следва тенденциите на изменение на вектора на моментното състояние, но представя по-ясно промените на зелената компонента за изследвания период.

На Фиг. 13 а) растерните изображения на посочния ъгъл много точно показват промяната на зелената Tasseled Cap компонента. Забелязва се, че промяната на отношението между Greenness компонентата и вектора на моментното състояние е най-стабилна именно в тестовите горски райони. Стойностите на индекса от 13/08/2007 преди пожара са по-ниски за тестовите участъци, сравнени със заобикалящите ги територии, което потвърждава устойчивостта на горските екосистеми. След пожара най-голяма динамика в стойностите на индекса се наблюдава на територията на двете най-засегнати от пожара гори. Тази тенденция се запазва до края на изследвания период като наблюденията за тези гори са, че възстановяването при тях е частично.

На Фиг. 13 б) разсейващата диаграма от 13/08/2007 визуализира диференциране на класовете пожар/преди пожар като стойностите на посочния ъгъл преди пожара са по-ниски, което е индикатор за добро вегетативно състояние на горите. На следващата диаграма от 25/08/2008 – една година след пожара – се наблюдава сливане на класовете и високи стойности на индекса и за двете изображения. През следващите години започва тенденция на диференциране на пространственото разпределение на двата класа и съответно подобряване на състоянието на горските екосистеми.







**Фиг. 13.**

**а) Растерни изображения на DA за периода 2007 – 2016 г. на територията на изгорялата площ от пожара от 29/08/2007. Горските екосистеми са обособени с черен цвят;**

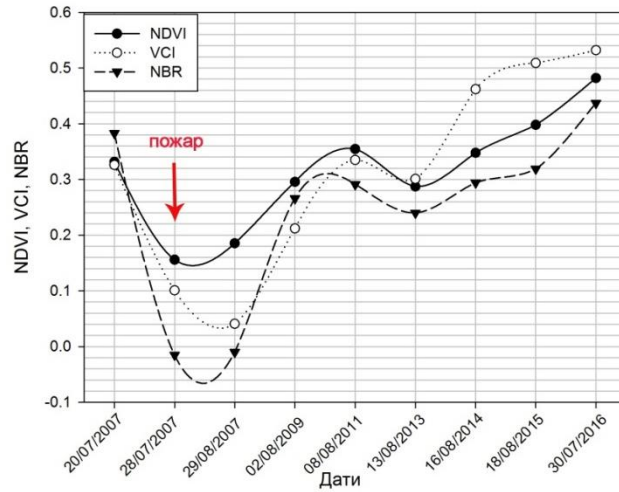
**б) Пространствено разпределение на DA за горските екосистеми на територията на пожара от 29/08/2007. Направена е сравнителна характеристика на DA за период от 10 г. – от 2007 г. до 2016 г., като на всяка фигура DA от съответната дата е сравнен с DA на пожара (29/08/2007) (с червен цвят)**

По аналогичен начин растерни изображения и пространствени разпределения на DI, VIC и DA са направени и анализирани и за другите два изследвани пожара.

## 4.2. АНАЛИЗ НА ИЗСЛЕДВАНИТЕ ВИ

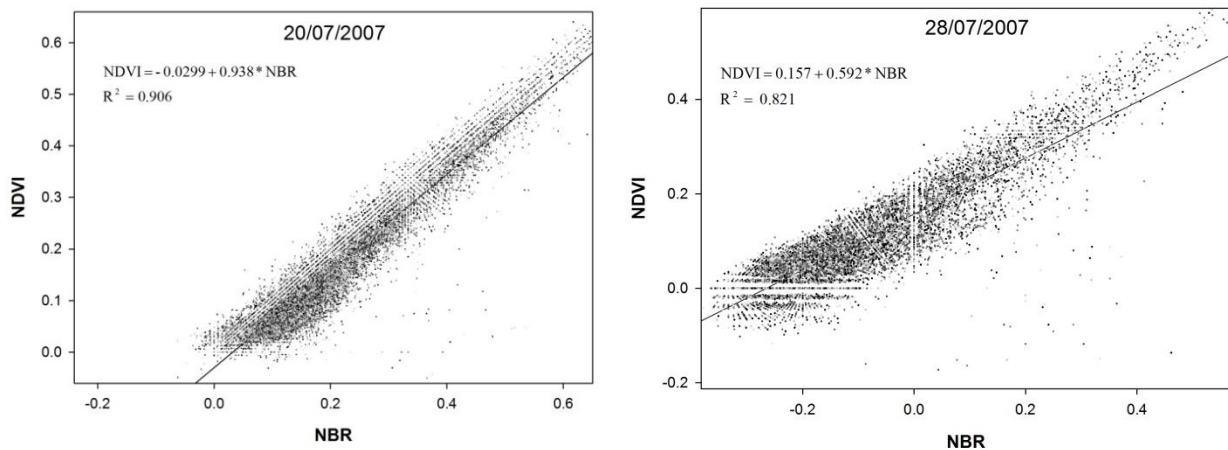
### 4.2.1. Анализ на NDVI, VCI и NBR

За изследване на възстановителните процеси са изчислени средните стойности на вегетационните индекси – NDVI, VCI и NBR – веднъж годишно по време на вегетационния период на територията на тестовите участъци, заети от горски екосистеми за период от 9 г. след настъпване на пожарите. Няколко дни преди пожарите ВИ показват високи средни стойности. Непосредствено след пожарите се наблюдава значителен спад в средните стойности и на трите индекса. Рязкото повишаване на стойностите на индексите след пожара се дължат най-вероятно на повята на инвазивни видове като резултат на разнообразието от възникналите вторични въздействия. В тенденцията на изследваните ВИ (NDVI, VCI и NBR) се наблюдава плавно повишаване на средните им стойности във времеви интервал след пожара, което потвърждава процеса на възстановяване на растителността (Фиг. 14). Флукуациите им се дължат на влиянието на външни фактори като температура и валежи, съпътстващи възстановителните процеси.



**Фиг. 14.** Изменение на средните стойности на NDVI, VCI и NBR за периода 2007 – 2016 г. за тестовите участъци с горски екосистеми на територията на пожара от 28/07/2007

2D- разсейващите диаграми на Фиг. 15 показват силната корелационна връзка между NDVI и NBR. Корелационният коефициент  $R^2$  е пресметнат на базата на данните от пространственото разпределение на стойностите на NDVI и NBR, като стойностите на  $R^2$  са високи за целия изследван период.

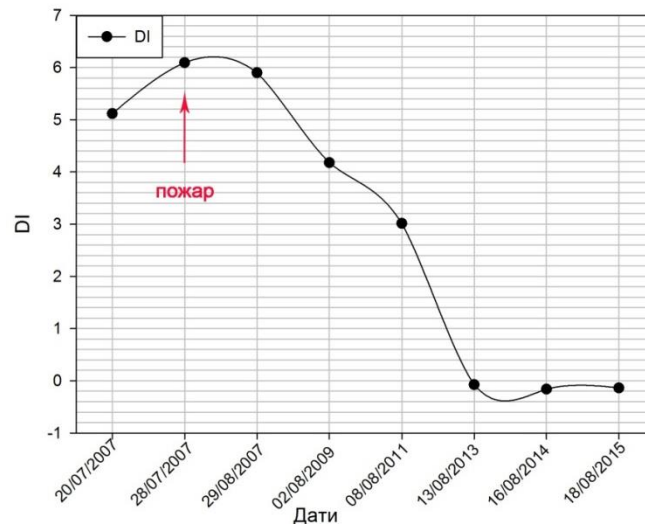


**Фиг. 15.** 2D-разсейващи диаграми и корелационният коефициент между NDVI и NBR за пожара от 28/07/2007

#### 4.2.2. Анализ на DI

С повишаване на стойностите на изследваните ВИ (NDVI, VCI и NBR) (Фиг. 14) стойностите на DI намаляват (Фиг. 16), което потвърждава високата степен на корелация между двата показателя (Станкова и др., 2016).



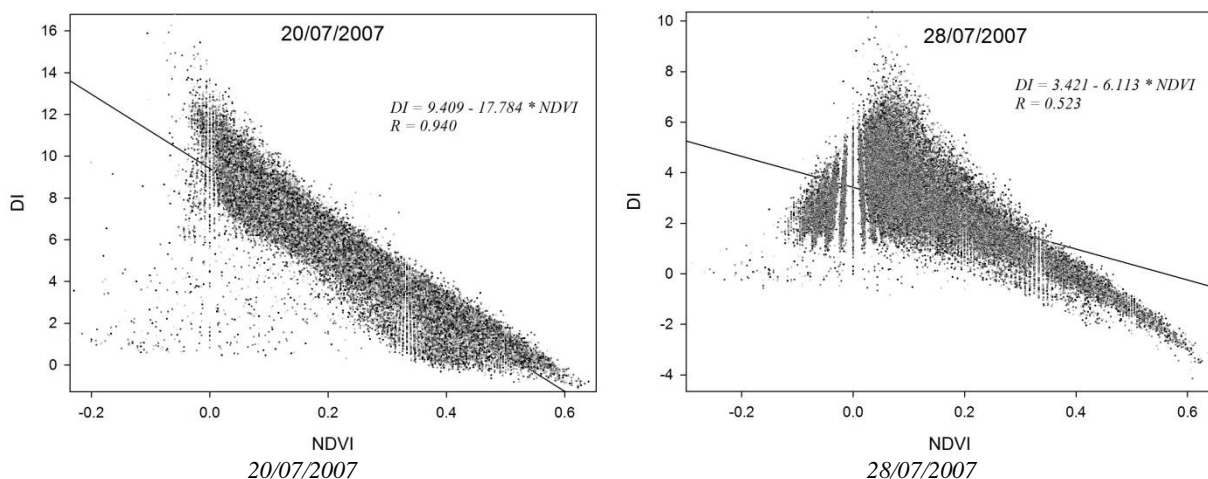


**Фиг. 16.** Изменение на средните стойности на DI за тестовите участъци с горски екосистеми на територията на пожара от 28/07/2007

В тенденцията на DI се наблюдава рязко намаляване на стойностите му (Фиг. 16), което потвърждава процеса на понижаване на смутеността в екосистемите. DI използва декорелирани компоненти, поради което при наличието на рязко изменение на състоянието на екосистемата, по-точно се отразява динамиката на последствията. Тъй като при DI се наблюдава рязко изменение на стойностите, а при вегетационните индекси това изменение е плавно, може да се направи извода, че DI е значително по-чувствителен към процеса на възстановяване, отколкото изследваните ВИ.

В заключение резултатите от настоящето изследване на възстановителния процес след пожар показват, че количествената оценка при използване на DI е по-информативна, отколкото с ВИ, тъй като DI е по-чувствителен към динамиката на изследвания възстановителен процес. Процесът на възстановяване се потвърждава с нарастване на стойностите на ВИ и едновременното намаляване на стойностите на DI (Станкова и др., 2016).

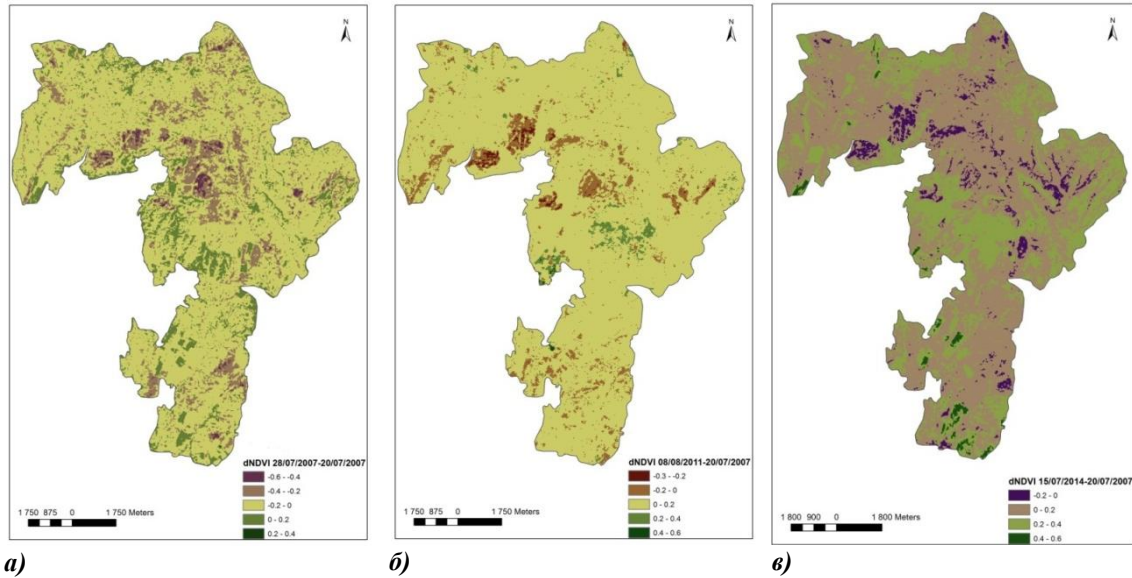
Изчислен е корелационният коефициент R между DI и NDVI (Фиг. 17). Корелацията е изчислена на базата на пространствените данни за DI и NDVI. Наблюдава се висока корелация между двата индекса през изследвания период като корелационният коефициент показва отрицателни стойности – с повишаване на стойностите на DI, тези на NDVI намаляват. Това доказва, че пресмятането на корелацията между DI и NDVI е добър подход за екосистемен мониторинг в случай на негативно въздействие.



**Фиг. 17.** 2D-разсейващи диаграми и корелационният коефициент между DI и NDVI за пожара от 28/07/2007

### 4.2.3. Анализ на dNDVI

Направената класификация на базата на dNDVI на територията на цялата опожарена площ от 28/07/2007 показва значителни изменения на dNDVI именно в тестовите участъци с горски екосистеми, което доказва негативното въздействие на пожара в тези области (Фиг. 18). Дефинирани са 5 класа на засегнатост според направената класификация. На Фиг. 18 б) и Фиг. 18 в) е изобразена dNDVI класификацията на възстановителния процес съответно 4 години след (Фиг. 18 б)) и 6 години след пожара (Фиг. 18 в)). Наблюдава се различна степен на възстановяване на тестовите участъци от наличните 5 класа като се обособяват и области, с напълно невъзстановими горски екосистеми.

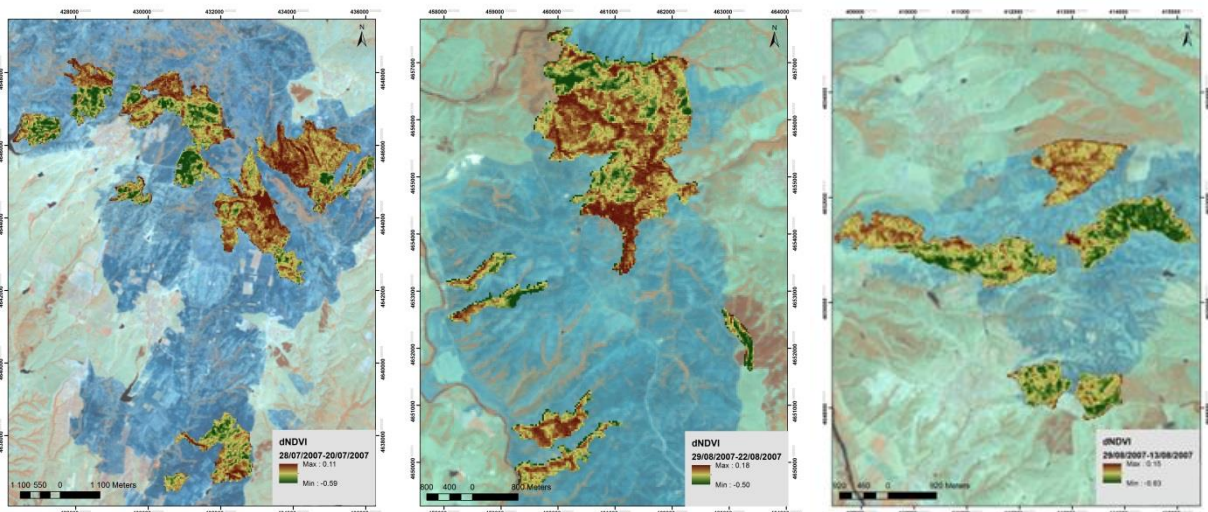


**Фиг. 18. dNDVI класификация на територията на пожара от 28/07/2007: а) dNDVI 28/07/2007 – 20/07/2007; б) dNDVI 08/08/2011 – 20/07/2007; в) dNDVI 15/07/2014 – 20/07/2007**

Под формата на растер на Фиг. 19 са визуализирани стойностите на dNDVI на територията на тестовите участъци с горски екосистеми за трите изследвани пожара.

$$dNDVI = NDVI_{\text{след пожара}} - NDVI_{\text{преди пожара}} \quad (7)$$

Наблюдават се значителни промени в стойностите на dNDVI на територията на тестовите участъци, което потвърждава загубата на горска растителност.

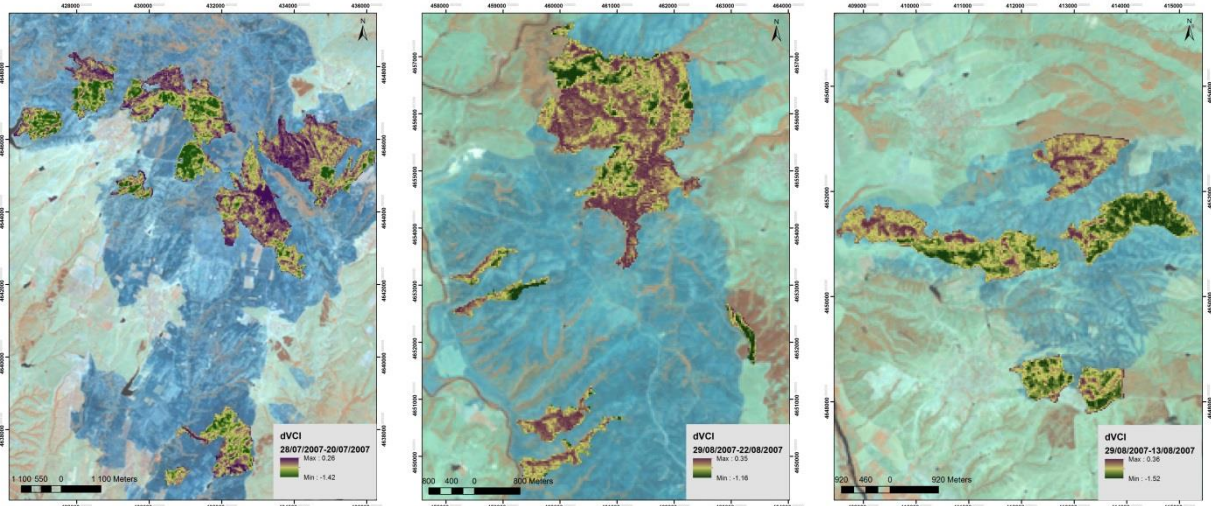


**Фиг. 19. Стойности на dNDVI върху спътниково изображение от Landsat няколко дни след пожара в спектрални канали 4-5-7 на територията на трите изследвани пожара**

#### 4.2.4. Анализ на dVCI

На Фиг. 20 под формата на растер са изобразени стойностите на dVCI, които до голяма степен повтарят тези на dNDVI.

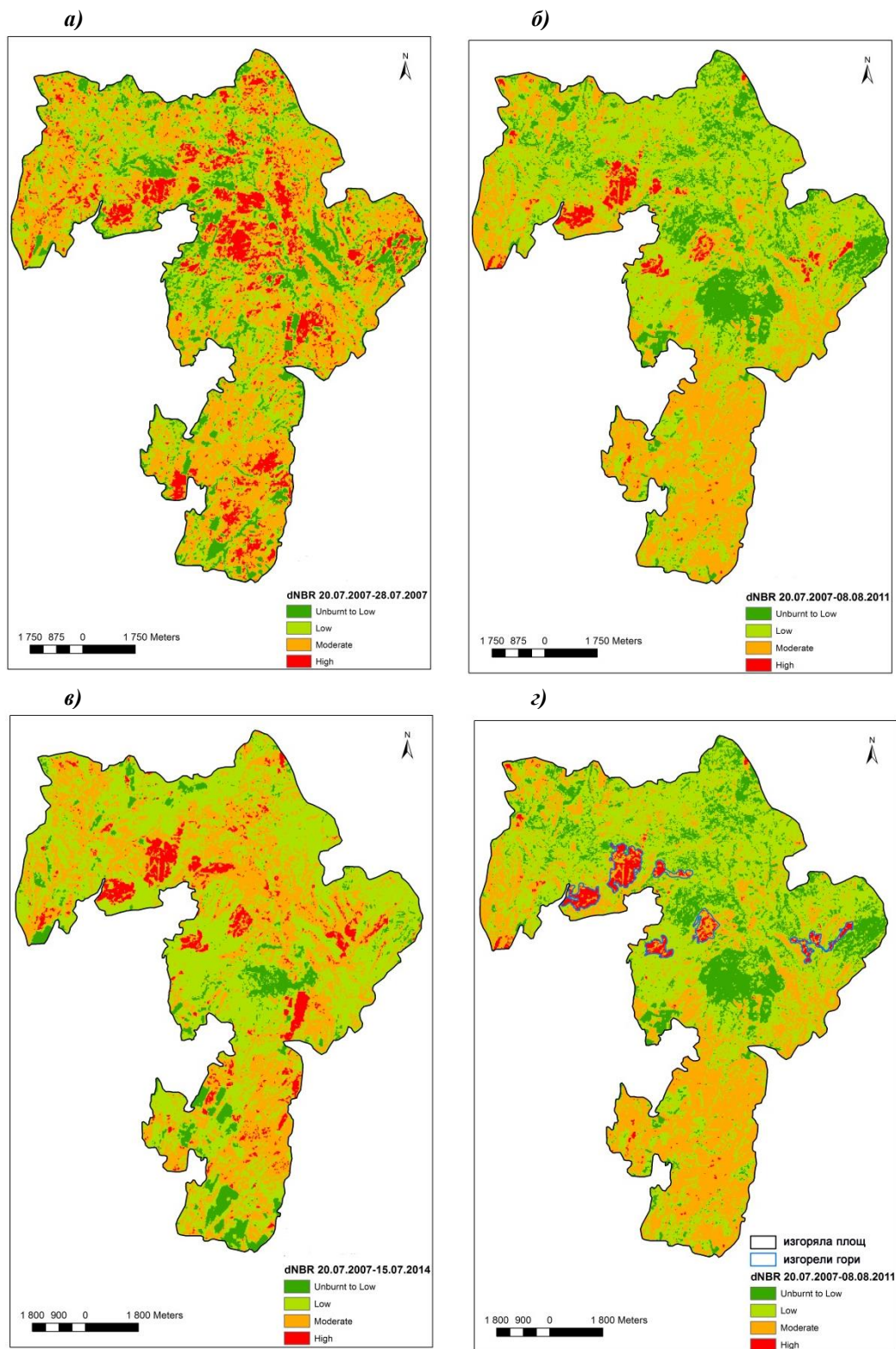
$$dVCI = VCI_{\text{след пожара}} - VCI_{\text{преди пожара}} \quad (8)$$



**Фиг. 20.** Стойности на dVCI върху спътниково изображение от Landsat няколко дни след пожара в спектрални канали 4-5-7 на територията на трите изследвани пожара

#### 4.2.5. Анализ на dNBR

Направена е класификация на базата на dNBR или т. нар. “burn severity map” на територията на цялата опожарена площ от 28/07/2007. Дефинирани са четири класа според степента на засегнатост (“burn severity”) – висока (high), средна (moderate), ниска (low) и незасегнати (unburnt to low) (Фиг. 21). С висока степен на засегнатост (high burn severity) се отличават именно тестовите участъци с горски екосистеми (Фиг. 21 а)), а по време на изследвания възстановителен период с червен цвят (high burn severity) се дефинират практически унищожените горски екосистеми (Фиг. 21 г)). Тази зависимост потвърждава силната корелационна връзка между dNBR и изгорелите горски участъци, определени чрез визуална интерпретация и фоторевизия на аерофото изображенията. Чрез използването на dNDVI и dNBR класификациите наблюдаваме различни степени на възстановяване на дефинираните класове като се обособяват и участъци с напълно унищожени горски екосистеми (Stankova and Nedkov, 2015).



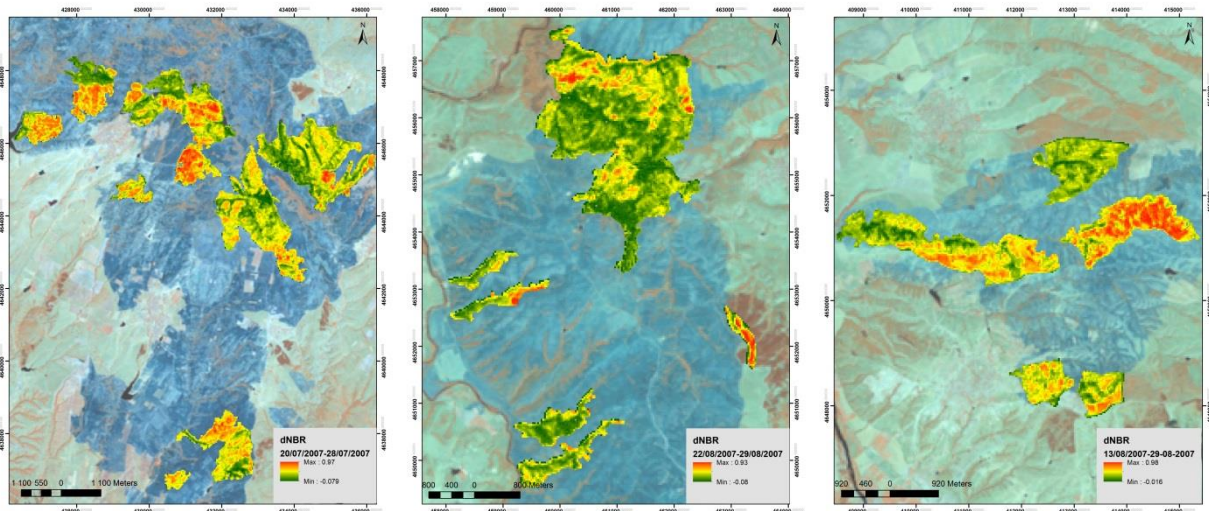
**Фиг. 21. dNBR класификация на територията на пожара от 28/07/2007:**

- а) dNBR 20/07/2007 – 28/07/2007**
- б) dNBR 20/07/2007 – 08/08/2011**
- в) dNBR 20/07/2007 – 15/07/2014**
- г) dNBR 20/07/2007 – 08/08/2011 с изгорелите гори**

На Фиг. 22 са показани т. нар. “burn severity map” или разликите в стойностите на dNBR преди и след пожара.

$$dNBR = NBR_{\text{преди пожара}} - NBR_{\text{след пожара}} \quad (9)$$

Наблюдават се значителни промени в стойностите на dNBR на територията на тестовите участъци, което потвърждава негативното влияние на пожара върху горските екосистеми.

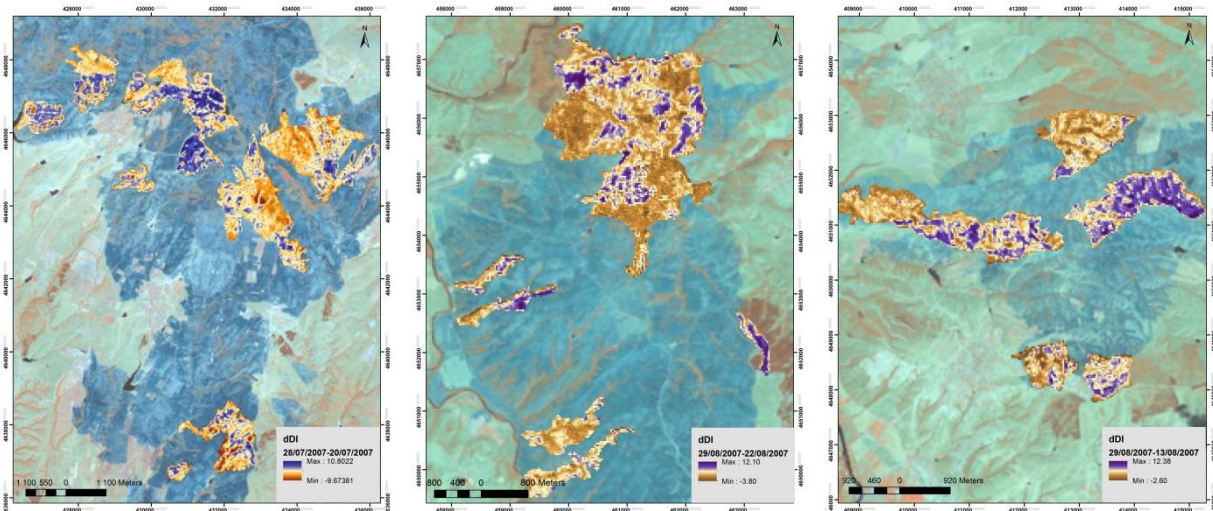


**Фиг. 22.** Стойности на dNBR върху спътниково изображение от Landsat няколко дни след пожара в спектрални канали 4-5-7 на територията на трите изследвани пожара

#### 4.2.6. Анализ на dDI

На Фиг. 23 са показани растерни изображения на dDI или разликите в стойностите на dDI след и преди пожара.

$$dDI = DI_{\text{след пожара}} - DI_{\text{преди пожара}} \quad (10)$$

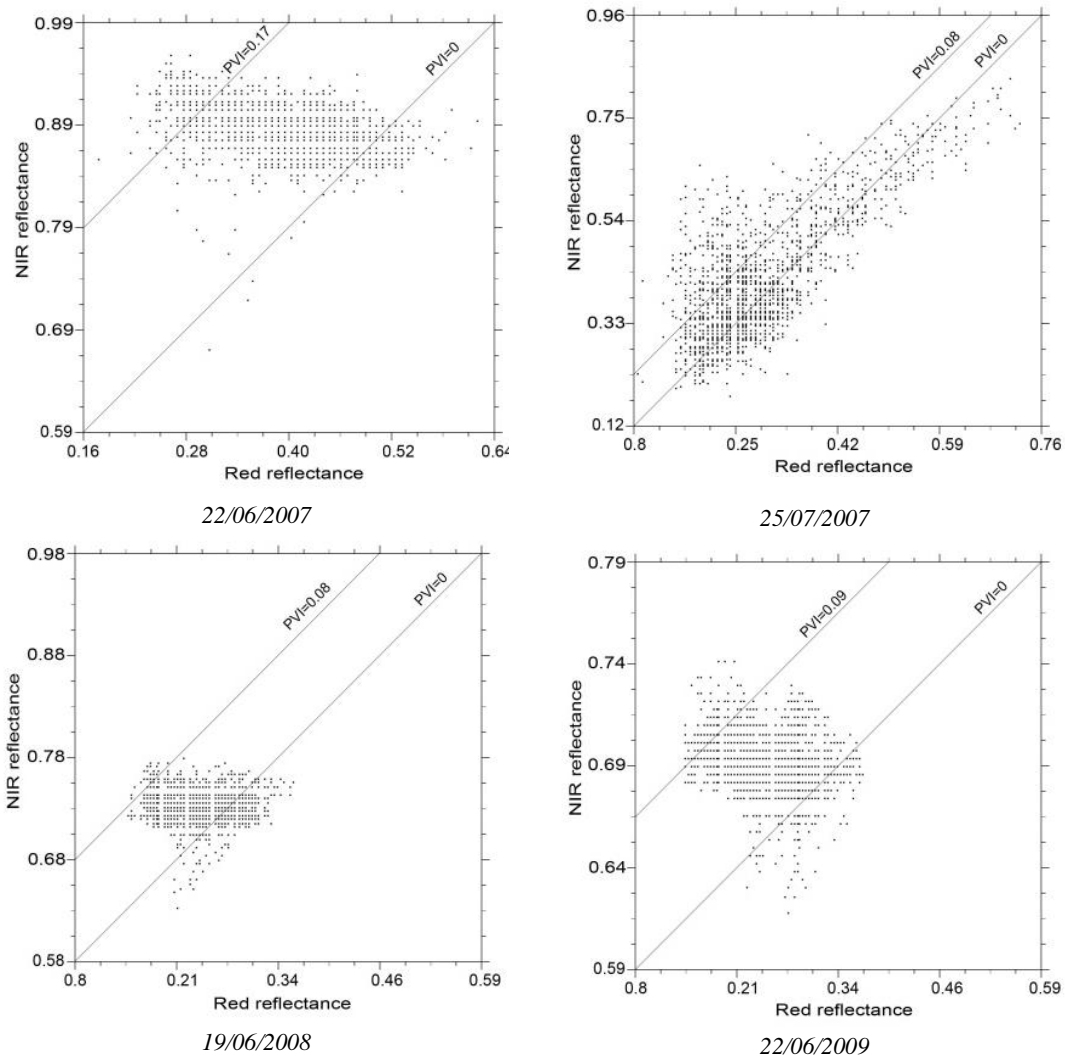


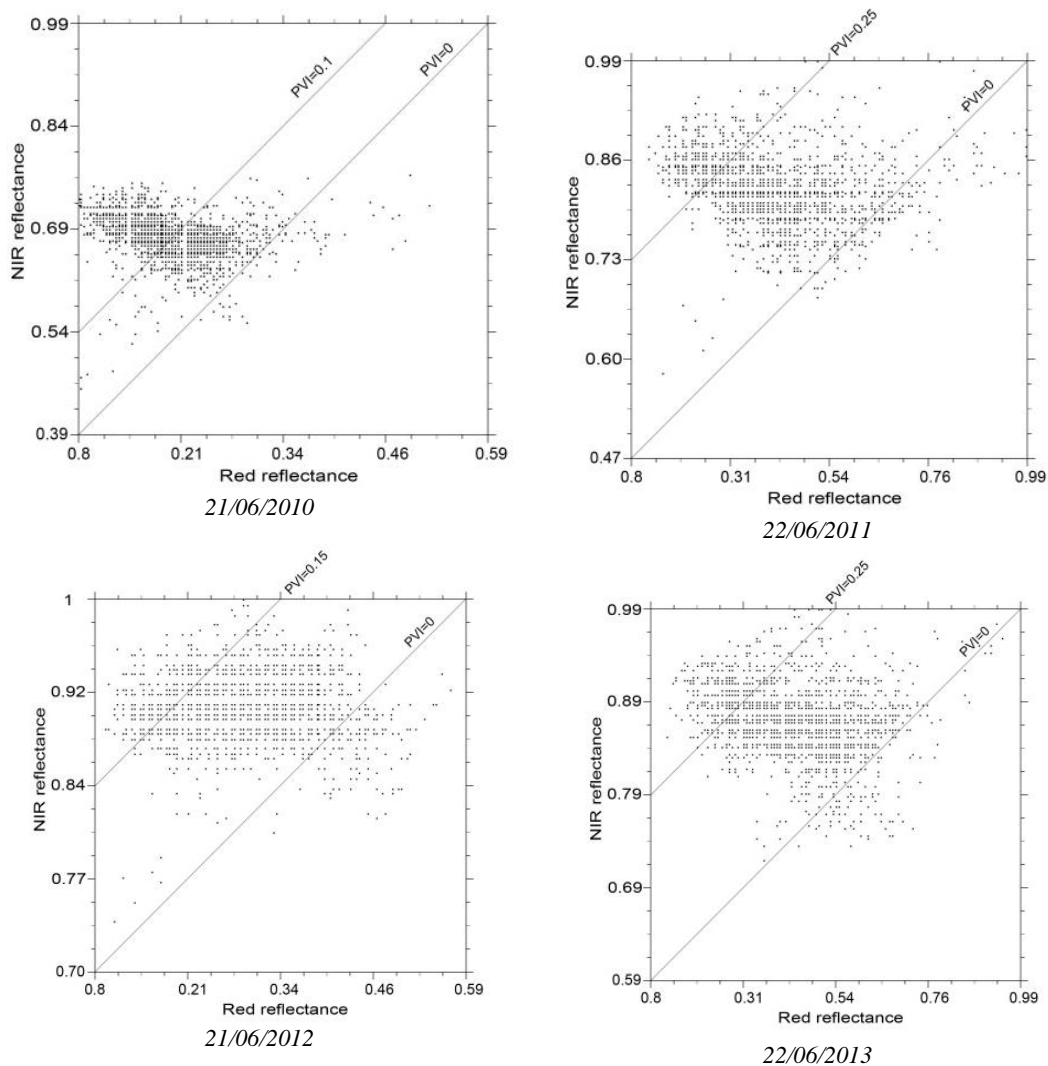
**Фиг. 23.** Стойности на dDI върху спътниково изображение от Landsat няколко дни след пожара в спектрални канали 4-5-7 на територията на трите изследвани пожара

### 4.3. АНАЛИЗ НА PVI

Тъй като спектралните промени в процеса на възстановяване в някои случаи могат да бъдат едва доловими, динамиката на възстановителния процес е възможно да бъде оценена и чрез използване на разсейващи диаграми (scatter diagrams), отразяващи отношението между червения и близкия инфрачервен спектрални канали на сензора. Линията, където PVI е нула съответства на почвената линия (soil line) за тези изображения (Фиг. 24).

Забелязваме, че PVI е много висок преди пожара и рязко понижава стойността си по време на пожара, заради загубата на растителност. На диаграмата от 25/07/2007 можем да отбележим, че повечето от елементите на земното покритие са разположени в клъстера на почвата. След пожара не се наблюдават особени промени със стойностите на индекса, заради едва доловимия възстановителен процес. PVI нараства за последните изследвани години, индикиращ разделяне на клъстера на растителността от този на почвата (Фиг. 24) (Stankova and Nedkov, 2015).

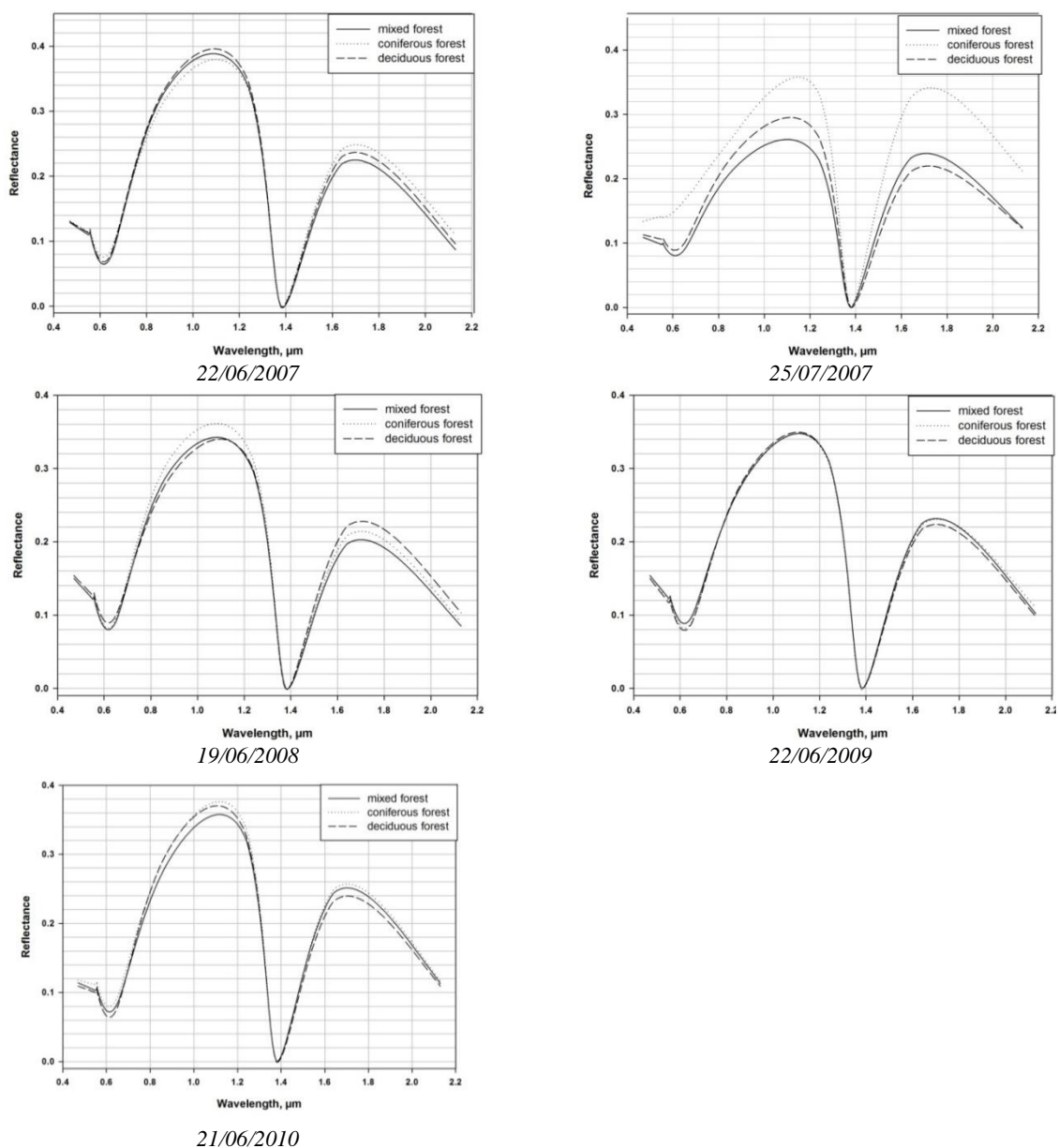




**Фиг. 24.** Изолинии на PVI, почвената линия и scatter диаграми, показващи отношението между отражението в червения и близкия инфрачервен спектрални канали на изображения от спътника Terra MODIS на територията на пожара от 28/07/2007

#### 4.4. СПЕКТРАЛНИ ОТРАЖАТЕЛНИ ХАРАКТЕРИСТИКИ

На Фиг. 25 са показани графики на спектрални отражателни характеристики от сензора MODIS на територията на тестови участъци с широколистни, иглолистни и смесени горски екосистеми. Поради ниската плътност на жива растителност след пожара наклонът на спектралната отражателна характеристика в областта на т. нар. „red edge” на графиката от 22/06/2007 не е толкова стръмен, колкото е на графиките от другите дати (Фиг. 25). Постепенна промяна в отражението на растителността може да се наблюдава в диапазона от червената до инфрачервената част на електромагнитния спектър. Поради намаляване на хлорофила абсорбцията в червения диапазон значително намалява и спектралното отражение в близкия инфрачервен диапазон се доближава до спектралното отражение на почвата. Това състояние на растителността се потвърждава също и от scatter диаграмата от 25/07/2007 (Фиг. 25) (Stankova and Nedkov, 2015).

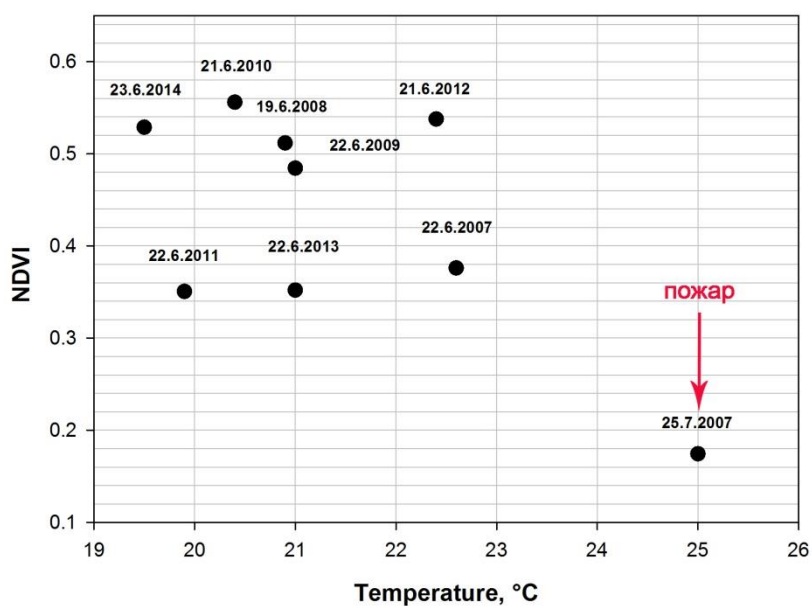


**Фиг. 25.** Графики на спектрални отразителни характеристики на изображения от спътника Terra MODIS на територията на пожара от 28/07/2007

#### 4.5. ВРЪЗКА НА NDVI С КЛИМАТИЧНИТЕ ПАРАМЕТРИ

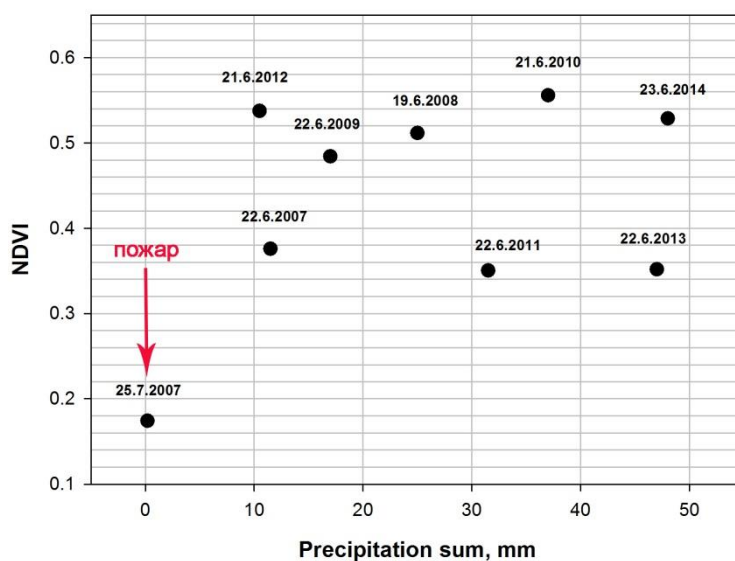
Използвани са първични климатични данни (<http://marswiki.jrc.ec.europa.eu/datadownload/index.php>), които са интегрирани и анализирани в ГИС среда. Селектирани са данните за температура, валежи и евапотранспирация за месец юни за всяка една от изследваните години. На базата на тези данни е пресметната средна месечна температура, средна месечна сума на валежи и средномесечна евапотранспирация за изследваните тестови участъци. На Фиг. 26 са сравнени средните стойности на NDVI за пожара 28/07/2007 със средните месечни температури на въздуха на тестовите участъци за изследвания период. Точката, кореспондираща на пожара (25/07/2007) се отличава от клъстера на другите стойности с най-нисък NDVI и най-висока температура.





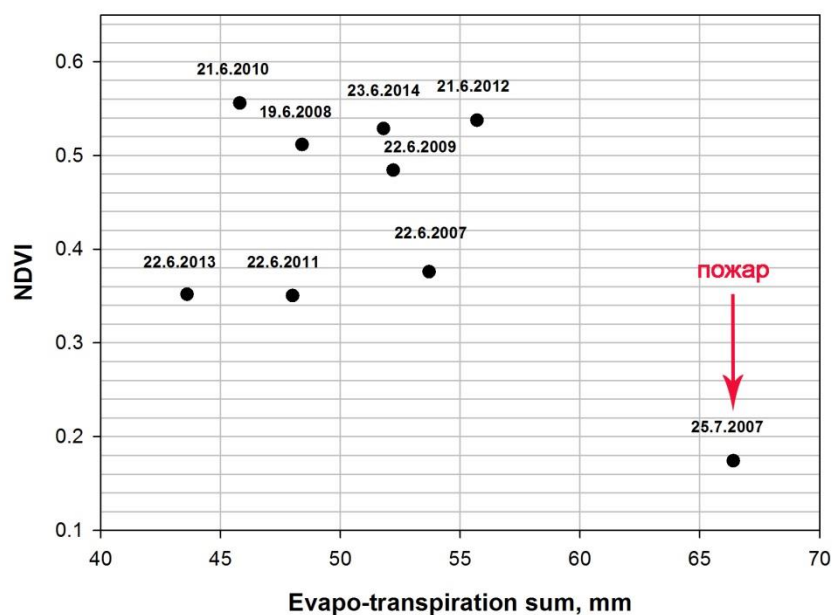
**Фиг. 26. Връзката между NDVI и средномесечната температура на въздуха на територията на изследваните тестови участъци**

На Фиг. 27 са сравнени средните стойности на NDVI за пожара 28/07/2007 със средната месечна сума на валежите на територията на изследваните тестови участъци. На тази графика ясно се идентифицира точката на пожара с ниска средномесечна сума на валежите и ниски стойности на NDVI.



**Фиг. 27. Връзката между NDVI и средната месечна сума на валежите на територията на изследваните тестови участъци**

На Фиг. 28 са сравнени средните стойности на NDVI за пожара 28/07/2007 със средномесечната евапотранспирация на територията на изследваните тестови участъци. Точката на пожара отново се различава от останалите стойности в графиката с нисък NDVI и висока средномесечна евапотранспирация.



**Фиг. 28. Връзката между NDVI и средномесечната евапотранспирация на територията на изследваните тестови участъци**

При анализа на получените резултати се установява, че разпределението на NDVI стойностите на другите точки от графиките е пряко зависимо от стойностите на климатичните характеристики.

### **ЗАКЛЮЧЕНИЕ**

Анализът на получените от изследването резултати показва различни тенденции на изменение на ВИ в процеса на възстановяване на горските екосистеми след пожар. В някои от случаите се наблюдават изменения на стойностите, свързани с климатични и други фактори, които не винаги могат да бъдат предпоставка за обективна оценка на възстановителния процес. Това означава по-ниска чувствителност на ВИ при оценка на възстановяването на горските екосистеми след въздействието на пожари. Сравнителният анализ на получените резултати при използването на нов подход, който използва модел, разработен на базата на DI, VIC и DA и резултатите, получени чрез ВИ, показва много по-висока чувствителност на DI, VIC и DA при оценка на възстановителните процеси.

При използване на DI, VIC и DA ясно и точно се идентифицират различните тенденции и детайли при изследване на възстановителните процеси в горските екосистеми след въздействието на пожари. Понижаването на DI показва ясна тенденция на устойчив процес на възстановяване на горските екосистеми. Устойчивото състояние на горските екосистеми се установява и от нововъведените показатели, което потвърждават и пространствените разпределения на техните стойности. Тенденцията на повишаване на VIC и устойчивост на DA е свързана с понижаване на стойностите на DI.

При използването на дистанционни изследвания на базата на спътникови данни за оценка на възстановителните процеси в горски екосистеми DI, VIC и DA дават по-точна и по-обективна информация, отколкото ВИ, тъй като те са по-чувствителни към динамиката на процеса. Получените резултати потвърждават приложимостта на въведените индекси за мониторинг на горските екосистеми.

## **ПРИНОСИ НА ДИСЕРТАЦИОННИЯ ТРУД**

### **НАУЧНИ ПРИНОСИ:**

1. Разработен е модел на базата на ортогонализирани спектрални спътникови данни за изследване на възстановителните процеси на горски екосистеми след пожар
2. Въведени са нови показатели (вектор на моментното състояние на екосистема и посочен ъгъл) на базата на ТС компонентите за количествена оценка на възстановителните процеси след пожар

### **НАУЧНО-ПРИЛОЖНИ ПРИНОСИ:**

3. Разработена е методика на базата на модела и нововъведените показатели, която е приложена за три пожара от югоизточна България за изследване на възстановителните процеси за период от десет години
4. Получени са резултати от прилагането на методиката, които валидират модела и нововъведените показатели
5. Получени са резултати за протичането на възстановителните процеси в горски екосистеми на територията на трите изследвани пожара за периода 2007-2016 г.

### **ПУБЛИКАЦИИ НА АВТОРА, СВЪРЗАНИ С ДИСЕРТАЦИОННИЯ ТРУД**

1. **Stankova N.**, Nedkov R., 2015: Monitoring the dynamics and post-fire recovery processes of different vegetation communities using MODIS satellite images, *Journal of Environment Protection and Sustainable Development* Vol. 1, No. 3, 2015, pp. 182-192
2. **Stankova N.**, Nedkov R., 2015: Investigation of forest vegetation dynamics before and after a fire by using aerospace data, *Ecological Engineering and Environment Protection* 1/2015, p. 40-46, ISSN 1311 – 8668
3. **Stankova N.**, Nedkov R., 2015: Monitoring forest regrowth with different burn severity using aerial and Landsat data, *Geoscience and Remote Sensing Symposium (IGARSS)*, 2015 IEEE International, 26-31 July 2015, p. 2166 – 2169, doi 10.1109/IGARSS.2015.7326233
4. **Станкова Н.**, Недков Р., 2015: Модел за количествена оценка на Disturbance Index и вектора на моментното състояние на екосистема след пожар на базата на аерокосмически данни, Единадесета научна конференция с международно участие, *Space, Ecology, Safety*, 4-6 ноември, 2015, София, с. 292-297
5. **Stankova N.**, Nedkov R., 2016: Research model of monitoring the recovery of an ecosystem after fire based on satellite and GPS data, *Ecological Engineering and Environment Protection* 1/2016, p. 5-11, ISSN 1311 – 8668
6. **Станкова Н.**, Недков Р., Иванова И., 2016: Изследване на последствията и състоянието на горски екосистеми след пожар чрез използване на дистанционни аерокосмически методи и данни, Дванадесета научна конференция с международно участие, *Space, Ecology, Safety*, 2-4 ноември, 2016, София (под печат)

## БИБЛИОГРАФИЯ

1. Бондев И., 1991: Растителността на България. Карта в М 1:600000 с обяснителен текст. Университетско издателство "Климент Охридски", София, 183.
2. Велизарова Е., 2014: Екологични последици, разпространение и оценка на риска от пожари в горите. Сборник научни публикации на Институт за гората, 145 години Българска Академия на науките, 97 – 105.
3. Велизарова Е., Ташев А., Йорова К., 2002: Тенденции и особености в изменението на някои свойства и показатели на горски почви засегнати от пожари. Лесовъдска мисъл. 3/ 4, 3 – 22.
4. Власев В., Китин Б., Петкова К., Ташев А., 2002: Възможности за ускорено възстановяване на засегнати от пожари горски площи. Гора, 4, 6 – 7.
5. Димитров П., Гиков А., 2009: Идентификация и оценка на следи от пожари в Рила планина чрез използване на спектрални индекси по данни от Landsat. Fifth Scientific Conference with International Participation Space, Ecology, Nanotechnology, Safety, 2–4 November, 2009, Sofia, Bulgaria.
6. Директива 2009/147/ЕО.
7. Директива 92/43/ЕИО.
8. Добринкова Н., 2012: Информационни системи за симулиране на поведението на горски и полски пожари, Дисертационен труд, Институт по математика и информатика, БАН, София.
9. Йонов Н., Милев М., Овчаров Д., Ташев А., 2000: Приоритети и проблеми при възстановяването на опожарените гори и защита на съседните незасегнати насаждения. Лесовъдска мисъл, 24, 35 – 45.
10. Карта на горите в България М 1:1 000 000, 1958.
11. Мардиросян Г., Жеков Ж., 2010: Аерокосмически технологии за изучаване на природните бедствия, 20th Anniversary International Scientific Conference 3 – 4 June, 2010, Stara Zagora, Bulgaria, 38 – 50.
12. Мардиросян Г., Рангелов Б., Близнаков А., 2011: Природни бедствия – възникване, последици, защита, АИ Авитконсулт., С., 170с., ISBN 978-854-92214-2-8.
13. Мардиросян, Г., 2009: Природни бедствия и екологични катастрофи – изучаване, превенция, защита, Акад. Издателство „Проф. Марин Дринов“, София, 2009, ISBN 978-954-322-350-3.
14. Найденов Я., 2015: Проблеми, провокирани от съвременната еколого-икономическа ситуация в света. Състоянието на горите, като елемент на екологичната сигурност. Природа, гора, общество. Природа и местообитания, човешна дейност и лов. Алтернативен и ловен туризъм. Проблеми и взаимосвързаност. Сборник предизводителство БЛРС том 3, 13 – 57.
15. Natura 2000. <http://natura2000.moew.government.bg/>.
16. Национална стратегия за устойчиво развитие на горския сектор в България, 2006 – 2015 г.
17. Овчаров Д., Ташев А., 2000: Въздействие на горските пожари върху вредната ентомофауна на опожарените площи. Наука за гората. 2 – 3, 37 – 44.
18. Петкова К., Ташев А., Власев В., 2003: Възстановяване на опожарени горски площи в района на ДЛ Свиленград. Сборник научни доклади Международна научна конференция 50 години Лесотехнически Университет, секция "Горско стопанство", 34 – 41.
19. Станкова Н., Недков Р., 2015: Модел за количествена оценка на Disturbance Index и вектора на моментното състояние на екосистема след пожар на базата на аерокосмически данни. Eleventh Scientific Conference with International Participation, Space, Ecology, Safety, 4 – 6 November, 2015, Sofia, 292 – 297.
20. Станкова Н., Недков Р., Иванова И., 2016: Изследване на последициите и състоянието на горски екосистеми след пожар чрез използване на дистанционни аерокосмически методи и данни. Дванадесета научна конференция с международно участие, Space, Ecology, Safety, 2 – 4 ноември, 2016, София (под печат).
21. Ташев А., Петкова К., Овчаров Д., Нусторова М., 2003: Влияние на пожарите върху горските екосистеми и методи за тяхното възстановяване. Международна научна конференция 75 години Институт за гората при БАН, София 1 – 5 октомври, Сборник научни доклади, 1, 298 – 304.
22. Avetisyan D., 2015: Assessment of vegetation cover degradation and soil erosion in Chuprene reserve (Northwestern Bulgaria) using remote sensing and geographical information systems. Ecological Engineering and Environment Protection, 1, 47 – 56.
23. Baret F., Guyot G., 1991: Potentials and limits of vegetation indices for LAI and APAR assessment. Remote Sensing of Environment, 35, 161 – 173.
24. Baret F., Guyot G., Major D., 1989: TSAVI: a vegetation index which minimizes soil brightness effects on LAI and APAR estimation. Proc. IGARSS'89 Symposium, 3, 1355 – 1358, Vancouver, Canada.

25. Bobbe T., Lachowski H., Maus P., Greer J., Dull C., 2001: A primer on mapping vegetation using remote sensing. *International Journal of Wildland Fire*, 10, 277 – 287.
26. Boer M., Macfarlane M., Norris J., Sadler R., Wallace J., Grierson P., 2008: Mapping burned areas and burn severity patterns in SW Australian eucalypt forest using remotely-sensed changes in leaf area index. *Remote Sensing of Environment*, 112, 4358 – 4369.
27. Brewer C., Winne J., Redmond R., Opitz D., Magrich M., 2005: Classifying and mapping wildfire severity: a comparison of methods, *Photogrammetric Engineering & Remote Sensing*, 71, 1311 – 1320.
28. Chen W., Moriya K., Sakai T., Koyama L., Cao C., 2014: Monitoring of post-fire forest recovery under different restoration modes based on time series Landsat data. *European Journal of Remote Sensing*, 47, 153 – 168. doi: <http://dx.doi.org/10.5721/EuJRS20144710>.
29. Chèret V., Denux J., 2007: Mapping wildfire danger at regional scale with an index model integrating coarse spatial resolution remote sensing data. *Journal of geophysical research*, 112, 1-11.
30. Crabtree R., Potter C., Mullen R., Sheldon J., Huang S., Harmsen J., Rodman A., Jean C., 2009: A modeling and spatio-temporal analysis framework for monitoring environmental change using NPP as an ecosystem indicator. *Remote Sensing of Environment*, 113, 1486 – 1496. doi: <http://dx.doi.org/10.1016/j.rse.2008.12.014>.
31. Crist E., Cicone R., 1984: A physically-based transformation of Thematic Mapper data – the TM Tasseled Cap. *IEEE Transactions on Geoscience and Remote Sensing*, 22, 256 – 263. doi: <http://dx.doi.org/10.1109/TGRS.1984.350619>.
32. Crist E., Kauth R., 1986: The Tasseled Cap de-mystified. *Photogrammetric Engineering and Remote Sensing*, 52, 81 – 86.
33. De Martonne E., 1926: Une nouvelle fonction climatologique: L'Indece d'aridite. *La Meteorologie*, 2, 449 – 458.
34. DeBano L., Neary D., Ffolliott P., 1998: 'Fire's effects on ecosystems.' (John Wiley and Sons: New York), 333.
35. Díaz-Delgado R., Lloret F., Pons X., 2003: Influence of fire severity on plant regeneration through remote sensing imagery. *International Journal of Remote Sensing*, 24, 8, 1751 – 1763.
36. Díaz-Delgado R., Lloret F., Pons X., 2003: Influence of fire severity on plant regeneration through remote sensing imagery. *International Journal of Remote Sensing*, 24, 8, 1751 – 1763.
37. Ecopolis, bulletin 48, 2001, [http://www.bluelink.net/bg/bulletins/ecopolis12/1\\_os\\_1.htm](http://www.bluelink.net/bg/bulletins/ecopolis12/1_os_1.htm).
38. Eva H., Lambin E., 1998a: Burnt area mapping in Central Africa using ATSR data. *International Journal of Remote Sensing*, 19, 18, 3473 – 3497.
39. Falkowski M., Gessler P., Morgan P., Hudak A., Smith A., 2005: Evaluating ASTER satellite imagery and gradient modelling for mapping and characterizing wildland fire fuels. *Forest Ecology and Management*, 217, 129 – 146.
40. Filchev L., Dimitrov P., 2013: Fire scars area estimation using CHRIS-Proba satellite data. Proc. 'ESA Living Planet Symposium 2013', Edinburgh, UK, 9 – 13 September 2013 (ESA SP-722, December 2013), 163 – 166.
41. Fiorella M., Ripple W., 1993: Analysis of Conifer Regeneration using Landsat Thematic Mapper Data. *Photogrammetric Engineering and Remote Sensing*, 59, 9, 1383 – 1388.
42. Hardy C., Brunnell D., Menakis J., Schmidt K., Long D., Simmerman D., Johnston C., 1999: Coarse-scale spatial data for wildland fire and fuel management. USDA Forest Service, Rocky Mountain Research Station, fire Sciences Laboratory, Online at: <http://www.fs.fed.us/fire/fuelman>.
43. Hardy C., Menakis J., Long D., Brown J., Brunnell D., 1998: Mapping historic fire regimes for the western United States: integrating remote sensing and biophysical data. 'Proceedings of the 7th biennial Forest Service remote sensing applications conference, 6 – 9 April, 1998, Nassau Bay, TX'. 288 – 300. (American Society for Photogrammetry and Remote Sensing: Bethesda, MD)
44. Healey S., Cohen W., Yang Z., Krankina O., 2005: Comparison of Tasseled Cap-based Landsat data structures for use in forest disturbance detection. *Remote Sensing of Environment*, 97, 301 – 310. doi: <http://dx.doi.org/10.1016/j.rse.2005.05.009>.
45. Henry M., Hope A., 1998: Monitoring post-burn recovery of chaparral vegetation in southern California using multi-temporal satellite data. *International Journal of Remote Sensing*, 19, 16, 3097 – 3107.
46. Holden Z., Smith A., Morgan P., Rollins M., Gessler P., 2005: Evaluation of Novel Thermal Enhanced Spectral Indices for Mapping Fire Perimeters and Comparisons with Fire Atlas Data. *International Journal of Remote Sensing*, 26, 4801 – 4808. doi: 10.1080/01431160500239008.
47. <http://earthexplorer.usgs.gov/>.
48. Hudak A., Robichaud P., Evans J., Clark J., Lannom K., Morgan P., Stone C., 2004: Field validation of Burned Area Reflectance Classification (BARC) products for post fire assessment. 'Proceedings of the Tenth Biennial Forest Service Remote Sensing Applications Conference.' CD-ROM, 13.

49. Huete, A., 1987: Spectral signatures and vegetation indices. II Reunión del Grupo de Trabajo en Teledetección, CDIT, Valencia.
50. Ichoku C., Kaufman Y., Giglio L., Li Z., Fraser R., Jin J., Park W. 2003: Comparative analysis of daytime fire detection algorithms, using AVHRR data for the 1995 fire season in Canada: Perspective for MODIS. *International Journal of Remote Sensing*, 24, 1669 – 1690.
51. Johansson M., Fetene M., Malmer A., Grandström A., 2012: Tending for cattle: traditional fire management in Ethiopian montane heathlands. *Ecology and society* 17, 19. doi:10.5751/ES-04881-170319.
52. Jones H., Vaughan R., 2010: “Remote sensing of vegetation. Principles, techniques, and applications”, OXFORD University Press, ISBN: 978-0-19-920779-4.
53. JRS Technical Reports, 2016, Forest fires in Europe, Middle East and North Africa 2015.
54. Kaufman Y., Kleidman R., King M., 1998: SCAR-B fires in the tropics: Properties and remote sensing from EOS-MODIS. *Journal of Geophysical Research*, 103, 31955 – 31968.
55. Kauth R., Thomas G., 1976: The Tasseled Cap – a graphic description of the spectral – temporal development of agricultural crops as seen by Landsat. Proceedings second ann. symp. machine processing of remotely sensed data. West Lafayette’ Purdue University Lab. App. Remote Sensing.
56. Key C., Benson N., 1999: The Normalized Burn Ratio (NBR): A Landsat TM Radiometric Index of Burn Severity. URL = <http://www.nrmssc.usgs.gov/research/ndbr.htm> visited April 2007.
57. Kogan F., Sullivan J., 1993: Development of global drought-watch system using NOAA/AVHRR data. *Advances in Space Research*, 13, 219 – 222.
58. Lefsky M., Cohen W., Harding D., Parker G., Acker S., Gower S., 2002: Lidar remote sensing of aboveground biomass in three biomes. *Global Ecology and Biogeography*, 11, 393 – 399.
59. Lillesand T., Kiefer R., 1987: *Remote Sensing and Image Interpretation* (New York: John Wiley & Sons).
60. Means J., Acker S., Harding D., Blair J., Lefsky M., Cohen W., Harmon M., McKee W. 1999: Use of large-footprint scanning airborne lidar to estimate forest stand characteristics in the Western Cascades of Oregon. *Remote Sensing of Environment*, 67, 298 – 308.
61. Miller J., Yool S., 2002: Mapping forest post-fire canopy consumption in several overstory types using multi-temporal Landsat TM and ETM data. *Remote Sensing of Environment*, 82, 481 – 496.
62. Molla, I., Velizarova E., 2017: Investigation of post-fire natural regeneration in forest plantations of *Pinus sylvestris* and *Larix decidua* on the Northern slopes of Rila mountain. *J. BioSci. Biotech*, ISSN 1314-6246, 89 – 95.
63. Molla, I., Velizarova E., Malcheva B., Bogoev V., Hadzhieva Y., 2014: Forest fire impact on the soil carbon content and stock on the north slopes of Rila Mountain (Bulgaria). *Ecologia Balcanica*, 5, 81 – 88.
64. Molla, I., Velizarova E., Zaharinova M., 2017: Fire severity assessment using NDVI derived from Landsat TM/ETM images and terrain data. *Ecological Engineering and Environment Protection*, 1, 29 – 37.
65. Parsons A., 2003: Burned Area Emergency Rehabilitation (BAER) soil burn severity definitions and mapping guidelines. USDA Forest Service, Forest Service Regional BAER Coordinators 2003 Draft Report. 12 pp. Online at: [http://fire.r9.fws.gov/ifcc/esr/Remote%20Sensing/soil\\_burnsev\\_summary\\_guide042203.pdf](http://fire.r9.fws.gov/ifcc/esr/Remote%20Sensing/soil_burnsev_summary_guide042203.pdf).
66. Richardson A., Wiegand C., 1977: Distinguishing vegetation from soil background. *Photogrammetric Engineering and Remote Sensing*, 43, 1541 – 1552.
67. Rollins M., Swetnam T., Morgan P., 2001: Evaluating a century of fire patterns in two Rocky Mountain wilderness areas using digital fire atlases. *Canadian Journal of Forest Research*, 31, 12, 2107 – 2123.
68. Rouse J., Haas R., Schell J., Deering D., 1973: Monitoring Vegetation Systems in the Great Plains with ERTS. Proceedings of Third Earth Resources Technology Satellite-1 Symposium, Greenbelt, MD, USA, 309 – 317.
69. Roy D., Giglio L., Kendal J., Justice C., 1999: Multi-temporal active-fire based burn scar detection algorithm. *International Journal of Remote Sensing*, 20, 5, 1031 – 1038.
70. Ruiz-Guillardo J., Castano S., Calera A., 2004: Application of remote sensing and GIS to locate priority intervention areas after wildland fires in Mediterranean systems: A case study from south-eastern Spain. *International Journal of Wildland Fire*, 13, 241 – 252.
71. Ryan K., Noste N., 1985: Evaluating prescribed fires. ‘Proceedings of the symposium and workshop on wilderness fire. 1983 November 15 – 18, Missoula Montana’ (Eds JE Lotan, BM Kilgore, WC Fischer, RW Mutch) USDA Forest Service, Intermountain Forest and Range Experiment Station General Technical Report INT-GTR-182 (Ogden, UT), 230 – 238.
72. Scholes R., Kendal J., Justice C., 1996: The quantity of biomass burned in southern Africa. *Journal of Geophysical Research*, 101, 23667 – 23676.

73. Seller, P., 1987: Canopy reflectance photosynthesis and transpiration II. The role of biophysics in the linearity of their interdependences. *Remote Sensing of Environment*, 21, 2, 143 – 183.
74. Smith A., Wooster M., 2005: Remote classification of head and backfire types from Modis fire radiative power observations. *International Journal of Wildland Fire*, 14, 249 – 254.
75. Smith A., Wooster M., Drake N., Dipotso F., Falkowski M., Hudak A., 2005: Testing the Potential of Multi-spectral Remote Sensing for Retrospectively Estimating Fire Severity in African Savanna Environments. *Remote Sensing of Environment*, 97, 92 – 115.
76. Smith A., Wooster M., Powell A., Usher D., 2002: Texture based feature extraction: application to burn scar detection in Earth Observation satellite imagery. *International Journal of Remote Sensing*, 23, 8, 1733 – 1739.
77. Stankova N., Nedkov R., 2015: Monitoring forest regrowth with different burn severity using aerial and Landsat data. *Geoscience and Remote Sensing Symposium (IGARSS), 2015 IEEE International*, 2166 – 2169. doi 10.1109/IGARSS.2015.7326233.
78. Stankova N., Nedkov R., 2015: Monitoring the dynamics and post-fire recovery processes of different vegetation communities using MODIS satellite images. *Journal of Environment Protection and Sustainable Development*, 1, 3, 182 – 192.
79. Stankova N., Nedkov R., 2016: Research model of monitoring the recovery of an ecosystem after fire based on satellite and GPS data. *Ecological Engineering and Environment Protection*, 1, 5 – 11, ISSN 1311 – 8668.
80. Tucker C., 1979: Red and Photographic Infrared Linear Combinations for Monitoring Vegetation. *Remote Sensing of Environment*, 8, 127 – 150. doi: [http://dx.doi.org/10.1016/0034-4257\(79\)90013-0](http://dx.doi.org/10.1016/0034-4257(79)90013-0).
81. Tucker C., Sellers P., 1986: Satellite remote sensing of primary production. *Int. Journal of Remote Sensing*, 7, 11.
82. Turner M., Hargrove W., Gardner R., Romme W., 1994: Effects of fire on landscape heterogeneity in Yellowstone National Park, Wyoming. *Journal of Vegetation Science*, 5, 731 – 742.
83. Viedma O., Meliá J., García-Haro J., Segarra D., 1996: Monitoring forest regeneration rates after fires with multitemporal Landsat TM imagery. *EaRSel Advantages in Remote Sensing*, 4, 146 – 154.
84. Wardlow B., Anderson M., Verdin J., 2012: Remote sensing of drought. *Innovative monitoring approaches*. CRC Press, Taylor and Francis Group, ISBN 978-1-4398-3557-9.
85. White J., Ryan K., Key C., Running S., 1996: Remote sensing of forest fire severity and vegetation recovery. *International Journal of Wildland Fire*, 6, 125 – 136.
86. Wooster M., Shukiv B., Oertel D., 2003: Fire radiative energy for quantitative study of biomass burning: Derivation from the BIRD experimental satellite and comparison to MODIS fire products. *Remote Sensing of Environment*, 86, 1, 83 – 107.