



## ИЗВЕСТИЯ НА БЪЛГАРСКОТО ГЕОГРАФСКО ДРУЖЕСТВО JOURNAL OF THE BULGARIAN GEOGRAPHICAL SOCIETY

web-site: [www.geography.bg](http://www.geography.bg) e-mail: [journal.bgs@geography.bg](mailto:journal.bgs@geography.bg)



### Приложение на спътниковите дистанционни изследвания за откриване на абиотичен стрес в иглолистни ландшафти

## Application of Satellite Remote Sensing for Detection of Abiotic Stress in Coniferous Landscapes

Лъчезар Филчев

Институт по космически изследвания и технологии – Българска академия на науките, секция „Дистанционни изследвания и ГИС“,  
1113 София, България, ул. „Акад. Георги Бончев“, бл. 1

Lachezar Filchev

Space Research and Technology Institute – Bulgarian Academy of Sciences, Department “Remote Sensing and GIS”,  
1113 Sofia, Bulgaria, Acad. Georgi Bonchev str., bl. 1

#### ABSTRACT

#### Key words:

satellite remote sensing, abiotic stress, coniferous landscapes, multispectral remote sensing, imaging spectrometry, fluorescence imaging

In the article is made an overview of the application of different satellite remote sensing methods and technologies in detection of the abiotic stress in coniferous landscapes. The review paper is discussing in short the application of different remote sensing technologies such as: satellite multispectral and infrared (thermal), imaging spectrometry and fluorescence imaging. The studied period spans from the onset of the satellite remote sensing in the 1960s until present day. In conclusion, are drawn requirements for the perspective technologies in satellite remote sensing which should address the fast and reliable detection of the manifestation of abiotic stress in coniferous landscapes.

### Въведение

Методите на дистанционните изследвания (ДИ) са основно апаратурни и се класифицират според използвания физичен принцип, активност, обзорност, разделителна способност, измервани физични параметри, начин на регистрация на данните и предаването им към Земята, орбитални параметри и др. Според използвания физичен принцип на регистриране на земната повърхност системите за ДИ се делят на: фотографски, телевизионни, сканерни, многозонални, инфрачервени, микровълнови, лазернолокационни, стереоскопични, спектрофотометрични, поляриметрични и др. (Марджироян, 2000).

От така класифицираните дистанционни методи най-широко приложение за откриване на стресови ситуации в горското стопанство имат методите на фотографските, телевизионни, сканерни, многоканални, инфрачервени, микровълнови, лазернолокационни, стереоскопични, спектрометрични ДИ.

Съобразно приложните задачи на ландшафтознанието, които се определят за решаване пред ДИ, се поставят и определени изисквания към системите за ДИ. От класификацията на Гарбук, Гершензон (1997) се вижда, че дистанционните методи във видимия, близкия инфрачервен

(ИЧ) диапазон и термалния инфрачервен (ИЧ) диапазон на електромагнитния спектър са преобладаващи при решаването на задачите на горското стопанство, свързани с оценка на пораженията на горските масиви, контрола на повредите върху горските насаждения от пестициди и вредители, откриване на горски пожари и др. През последните години се наблюдава и все по-широко приложение на поляриметричните и микровълновите методи – радарни дистанционни методи, както и комбинирани лидарни – лазернолокационни и спектрометрични ДИ за решаване на горепоменатите приложни задачи Данилин, Медведев (2005).

За измерване на атмосферните замърсявания се прилагат и дистанционни спектрално-оптически методи, които подобно и на спътниковите ДИ се делят на активни и пасивни според източника на електромагнитно лъчение. От тези методи най-голямо приложение намират лидарните, които от своя страна се делят на: метод на сравнителното поглъщане, метод на комбинираното разсейване и на резонансната флуоресценция. Поради голямата точност на тези измервания те се използват при калибрирането и валидирането на резултатите от спътниковите ДИ за определяне на замърсяващите съставки в атмосферата (Израел, Назаров и др., 1987; Sigris, 1994).

## Материали и методи

В настоящата статия е направен литературен обзор на различни научни източници на английски, български и руски език, достъпни на автора. За тази цел са използвани световните бази данни за реферирани научна литература като SCOPUS, Science Direct (Elsevier), Web of Science (Clarivate), както и научни социални мрежи, като ResearchGate и реферираната литература с отворен достъп, налична в Google Scholar и Google Books. Като съществени трудности пред написването на статията трябва да се отбележат сложният и понякога затворен достъп до докладите от конференции и годишни срещи от периода преди създаването на гражданската програма за дистанционни изследвания Landsat в началото на 70-те години на 20-ти век. Съществено затруднение е и липсата на научна информация за изследванията, провеждани в Китай, които се реферират само частично в световните бази данни.

## Резултати

### Спътникови многоканални дистанционни методи за откриване на абиотичен стрес

Използването и приложението на многозоналните дистанционни методи в горското стопанство и ландшафтознанието имат дълга история на приложение за откриване на повреди в горските насаждения (Сухих, Синуцишина, 1979; Выгодская, Горшкова, 1987; Franklin, 2001). Стресовите ситуации при горската и по-специално при иглолистната растителност, а в по-широк план ландшафтните, доминирани от иглолистни насаждения, са обект на изследване на ДИ от 20-те години на 20-ти век, като най-ранните приложения се свързват с използването на панхроматични аерофотоснимки за очертаване на засегнатите от болести и вредители, горски пожари и др. природни бедствия горски насаждения в Онтарио, Канада (Сухих, Синуцишина, 1979). По-късно през 50-те години на 20-ти век в САЩ и СССР се изготвят методики за дешифриране на горите по аерофотоснимки, като наред с това се появяват работи, засягащи въпросите за избор и оценка на материалите, аерофотоснимките от различни фотоматериали и мащаби за лесопатологическото дешифриране. С появата на инфрачервената фотография се разширяват възможностите за откриване на стресови ситуации в горските насаждения, като въпреки това повечето автори считат, че обикновената цветна фотография е достатъчно информативна за отделяне на засегнатите горски участъци (Heller, 1969; Сухих, Синуцишина, 1979). На 3 октомври 1962 г. американският космонавт У. М. Ширра прави първите 12 панхроматични снимки на земната повърхност в диапазона (λλ 320-720 nm), използвайки шест различни сфетофилтъра и по този начин се поставя началото на многозоналните спътникови ДИ (Виноградов, Кондратиев, 1971). По-късно с появата на пилотируемите орбитални станции, като „Skylab”, „Салют” и програмата „Аполло”, започва приложението на спътникови многоканални данни при оценката на стресови ситуации при иглолистни гори (Badgley, Colvocoresses et al., 1968; Warren, 1969). Първите многоканални спътникови фотоснимки, получени на борда на съветския пилотируем космически кораб (ПКК) „Съюз-12” с помощта на 9-канална камера КН-3, са направени през 1973 г. А първите аналогични многоканални изображения, получени от американската орбитална станция „Скайлаб”,

са от 8-каналната S190B, както и спектрофотометричната S191 аерофотокамери. Още с извеждането в орбита на първите спътници от серията Landsat през 1972 г., известни първоначално като ERTS, са установени едни от най-големите антропогенни замърсявания около металургичния център в гр. Уоба, провинция Онтарио, Канада, с дължина на засегнатата зона 50-60 km и ширина 20-30 km в посока, противоположна на посоката на преобладаващите ветрове в района от Юг Югоизток (Murtha, Watson, 1974; Виноградов, 1981). Още с тези изследвания е установена оптичката зависимост на повишаване на отражателната способност на растителността в оранжево-червената област на спектъра (λλ 0.6-0.7 μm), а на тази основа са определени три зони на замърсяване около металургичния комбинат. По същото време с използване на многоканални спътникови снимки аналогични изследвания са правени и в СССР в зони около металургични предприятия на алуминиевата промишленост, където е отбелязано масово изсъхване на борови насаждения (Соков, Рожков, 1975). В зоната около никелов обогатителен комбинат в лесотундрата е установена парагенетична зона на изменение на екосистемата, проследима на телевизионни многоканални снимки с километрова разделителна способност (Куприянов, Прокачева, 1976). С помощта на многоканални изображения около медодобивен комбинат е установена зона от 28 напълно нарушени екосистеми и зона със силно нарушени екосистеми от 40 km<sup>2</sup> (Макунина, 1978). Широка известност сред обществеността придобиват и заснеманията от разузнавателни спътници на САЩ във връзка с инцидента с Чернобилската АЕЦ, когато Кихоул-11-б (международен номер 84 122-1) заснема пораженията, нанесени на околната среда в и около АЕЦ „Чернобил”. Впоследствие са изготвени и разширени оценки на влиянието на аварията на АЕЦ „Чернобил” върху биотата и в частност - иглолистната растителност, с добилата известност т.нар. „червена гора” (Red forest), изсъхнала в резултат на отложенията от радиоактивния облак (Richelson, 1990). В оценката на последствията в резултат от аварията в Чернобил се включват и спътникови платформи с гражданско предназначение, като SPOT-1, Landsat TM и др., на основата на които научната общност прави своите анализи за състоянието на околната среда в района на аварията. Спътници като SPOT-1, изведени в орбита само 20 дни преди катастрофата в АЕЦ „Чернобил”, успяват да дадат първите изображения на 6 май 1986 г., с което започва и началото на оценките на последствията върху околната среда. В резултат на взетите мерки по почистването на радиоактивните продукти от околната среда първите иглолистни гори, пострадали пряко от аварията, както и повърхностния почвен хоризонт (10-30 cm) в района на деконтаминацията са иззети. Нарушените нормални процеси на самовъзстановяване (образуване на шишарки) на иглолистните гори се възобновяват едва 10 години след аварията в отчуждената зона от мястото на инцидента в радиус 30 km (25 years of satellite imagery over Chernobyl, 2011).

От многоканалните спътникови радиометри с висока пространствена разделителна способност (ПРС) с най-голяма известност и приложимост при откриване на стресови ситуации при горски насаждения са: френският SPOT HRV и HRG, американските Landsat 5 TM и Landsat 7 ETM+ и ASTER на борда на EOS Moderate resolution imaging spectroradiometer (MODIS) - TERRA, спътниците от серията DMS, японският ALOS-PALSAR, индийските IRS-1D и 1C/LISS-3, руският „Ресурс-ДК” и RapidEye; както и радиометрите

свс сврхвисока ПРС: GeoEye-1, IKONOS-2, QuickBird, OrbView-3, WorldView-2 и др. (Van Der Meer, Schmidt et al., 2002). От спътниците с ниска ПРС най-често използваните за оценка на стресови ситуации на ниво регион, страна, континент, биом са американските спектрометри TERRA и AQUA по програмата EOS-MODIS, SeaWiFS на борда на SeaStar, AVHRR на борда на NOAA, руските „Метеор”, MSU-SKI на борда на „Ресурс-ОП”, Medium Resolution Imaging Spectrometer (MERIS) на борда на Envisat-1, както и SPOT VEGETATION 1 и 2 на борда на френските SPOT 4 и SPOT 5, заменени впоследствие от SPOT 6 и SPOT 7. За разлика от спектрометричните дистанционни методи, които изследват стресовите ситуации по избрани абсорбиционни линии в спектъра на растенията, многоканалните сензори не разполагат с тези възможности. Ограничеността на съвременните спътникови системи за ДИ при заснемането и предаването на информацията на наземния сегмент се дължи основно на ограниченията в паметта, енергозахранването и телеметричните системи, което дава възможност от друга страна за развитие на други технически решения при многоканалните системи, като например многозглобо заснемане, висока времева разделителна способност, стереозаснемане и др., които позволяват друг тип анализи и оценки на състоянието на горските насаждения. Така например американският радиометър MISR заснема една и съща територия от 9 позиционни ъгъла с цел пресъздаване на индикатрисата на отражение на обекта, а европейският радиометър CHRIS на борда на PROBA заснема до 62 канала едновременно от 4 позиционни ъгъла.

### Спътникови инфрачервени дистанционни методи за откриване на абиотичен стрес

Детайлен обзор на теорията и приложенията на термалните изображения за изучаване на взаимодействията между растенията и водата и за диагностика и мониторинг на заболяванията при растителността, е представен от (Jones, Schofield, 2008). Инфрачервените (ИЧ) изображения се използват предимно, за да се изучават взаимодействията между растителността и водата и по-специално листната температура. В редки случаи температурата на листата може да бъде засегната от други физиологични процеси: например генерираната топлина при екзотермични процеси, замръзването на водата в листата, докато в някои изключителни случаи на високи нива на дишане, например при *Agave spadic*, повишените температури се генерират от тези повишени респираторни нива (Chaerle, Van Der Straeten, 2000). В повечето случаи температурата, генерирана от дишането, е твърде малка като количество, за да има отличим ефект върху листната температура. Основният проблем с използването на термалните изображения за оценяване на проводящата способност на устицата и/или нивата на дишането е, че листната температура ( $T_l$ ) по всяко време и по комплексен начин зависи от температурата на въздуха ( $T_a$ ), влажността на въздуха ( $e$ ), скоростта на вятъра ( $u$ ) и абсорбираната нетна радиация ( $R_n$ ), както е дадено в уравнение (1) (Jones, Schofield, 2008).

$$T_l - T_a = \frac{(r_{HR} * (r_{AW} + r_s) * \gamma * R_{ni} - \rho * c_p * r_{HR} * D)}{(\rho * c_p (\gamma * (r_{AW} + r_s)) + s * r_{HR})} \quad (1)$$

където  $r_s$  е устойчивостта на листата на водните пари (равно на реципрочната стойност на проводящата способност на стомата) и се счита, че е доминирано от

резистентната способност на стомата ( $s.m^{-1}$ ),  $r_{AW}$  е граничният слой на устойчивост на водната пара ( $s.m^{-1}$ ),  $R_{ni}$  нетната изотермална радиация или нетната радиация, която може да бъде абсорбирана от листото, ако то се намира на стайна температура ( $W.m^{-2}$ ),  $\rho$  - плътността на въздуха ( $kg.m^{-3}$ ),  $s$  - специфичният топлинен капацитет на въздуха ( $J.kg^{-1}.K^{-1}$ ),  $s$  - наклонът на кривата, свързваща налягането на наситените водни пари с температурата ( $Pa.^{\circ}C^{-1}$ ),  $\gamma$  - психрометричната константа ( $Pa.K^{-1}$ ) и  $r_{HR}$  паралелното съпротивление на топлината и трансфера на радиацията ( $s.m^{-1}$ ) и  $D$  - дефицитът на налягането на водните пари ( $Pa$ ). Това уравнение може да бъде преподредено, за да се даде следното изражение за проводящата способност на устицата (Jones, Schofield, 2008):

$$r_s = \frac{-\rho * c_p * r_{HR} (s * (T_l - T_a) + D)}{(\gamma * ((T_l - T_a) * \rho * c_p - r_{HR} * R_{ni}))} - r_{AW} \quad (2)$$

Въпреки, че принципно е подходящо да се измерват всички тези променливи на околната среда заедно с листната температура и да се изчислява проводящата способност от това е по-лесно да се използва референтен модел на листата, които са както мокри и дишащи на максимални нива, или сухи и недишащи (Jones, Schofield, 2008). В този случай съпротивлението на устицата може да бъде оценено от:

$$r_s = \frac{(r_{AW} + \frac{s}{\gamma} * r_{HR}) * (T_l - T_{wet})}{(T_{dry} - T_l)} \quad (3)$$

където първият член зависи основно от скоростта на вятъра.

За водния стрес често се приема дефинирането на Crop Water Stress Index (CWSI) по Idso, Jackson, et al. (1981), като:

$$CWSI = \frac{(T_{canopy} - T_{nws})}{(T_{max} - T_{nws})} \quad (4)$$

където  $T_{max}$  е температурата на сухата повърхност и  $T_{nws}$  е емпиричната температура на “не водно стресирана основа (baseline)” (това е насаждението, дишащо на потенциални нива в същата околна среда при оптимални поливни нива – добра почвена влагозапасеност). Стойността на CWSI - 0 е индикативна за отсъствие на воден стрес, и стойност от порядъка на 1 е показателна за максимален воден стрес (Thermal Crop Water Stress Indices, 2001). Този индекс е ефективна мярка за отбореността на устицата на листата. Индексът за температурното състояние на растителността - Temperature Condition Index (TCI) е разработен, за да апроксимира значението на термалните канали при оценката на състоянието на растителността. Формулата на TCI има следния вид:

$$TCI = \frac{100 * (T_{max} - T)}{(T_{max} - T_{min})} \quad (5)$$

където  $T$  е действителната изгладена стойност на седмичните температурни суми,  $T_{max}$  и  $T_{min}$  са максималните и минималните изгладени температури за същите седмици за многогодишен период на наблюдение. Така например на основата на опитни данни е открито, че яркостните температури на каналите на AVHRR 4 и 5 ( $K^{\circ}$ ) зависят основно от температурата на земната повърхност, абсолютната

влажност на въздуха и вертикалния температурен градиент земна повърхност-атмосфера (Gutman et al., 1995). Първите спътникови спектрометри и радиометри, заснемащи в термалната ИЧ област от спектъра са метеорологичните спътници от серията Nimbus – Nimbus-III и руските „Космос” - „Космос”-243 (Hanel, Congath, 1969; Башуринов, Гурвич, и др., 1969). Най-известните оперативни спътникови радиометри, заснемащи в ИЧ област от спектъра и със значителен архив от натрупана информация за дълъг период от време – от 80-те и 90-те години на 20-ти век до наши дни – са Multispectral Scanner System (MSS) на борда на Landsat 4, Thematic Mapper (TM) на борда на Landsat 4 и 5, както и Enhanced Thematic Mapper Plus (ETM+) на борда на Landsat 7. От каналите на ETM+: 5-ти заснема в диапазона 1.55–1.75  $\mu\text{m}$  и има 30 m ПРС, 6-ти в 10.4–12.5  $\mu\text{m}$  със 120 m ПРС и 7-ми в 2.08–2.35 с 30 m ПРС. При тази система 5-ти и 7-ми канал се използват най-често за откриване на геоложки находища на Si и скарнови карбонатни находища на различни минерални находища, докато 7-ми канал се използва най-често при изследване на собственото топлинно излъчване на земната повърхност (van der Meer, de Jong, 2006). Един от основните радиометри, заснемащи в ИЧ област на електромагнитния спектър е Advanced Spaceborne Thermal Emission and Reflectance Radiometer (ASTER) на борда на EOS-AM1 TERRA, разработен съвместно от японската космическа агенция (JAXA) и NASA. Този радиометър заснема в три канала във видимата и близката ИЧ област на спектъра с 15 m пространствена разделителна способност, шест канала в близката ИЧ с 30 m ПРС – от 2003 г. нефункционални поради проблеми с охлаждането на сензорите, и пет канала в топлинната ИЧ област с ПРС от 90 m. Друг сателитен сензор с ниска ПРС на борда на EOS-AM1 TERRA на NASA е MODIS. Той заснема в 36 канала, във видимата и инфрачервената област на спектъра в спектралния диапазон 0.4 – 14.4  $\mu\text{m}$ .

### Спектрометрични спътникови дистанционни методи за откриване на абиотичен стрес

Спектрометричните ДИ за разлика от останалите системи на ДИ, регистрират спектралния коефициент на отражение (СКО) на природните обекти в поредица тесни – от порядъка на 10 nm и по-малко, последователни спектрални канали (Мардиросян, 2000; Мишев, Добрев и др., 1987; van der Meer, de Jong, 2006). Получаваната спектрограма е функция от физико-химичните (степенна на влажност) и биологични (фенологичното състояние, проективното покритие и др.) особености на заснемания обект (Бакланов, 2009; Выгодская, Горшкова 1987; Гарбук, Гершензон, 1997; Криноф, 1947; Мардиросян, 2000; van der Meer, de Jong, 2006; Charles, Zyl, 2006). Стойността на яркостта на дадено природно образувание –  $L$ , или излъченият поток за пространствен ъгъл от неточков източник в определена посока за единица проектирана площ на източника в тази посока, зависи от интензивността на падащата радиация  $E_0(\lambda_i)$  и от отражателните свойства на природното образувание. Самата яркост на природното образувание се трансформира от влиянието на предавателната функция на атмосферата, която има следния вид, Мишев и др., (1987):

$$P_{\lambda_i}(H) = \frac{L(\lambda_i, \theta, \varphi, H)}{L_0(\lambda_i, \theta, \varphi, H_0)} \quad (6)$$

където, определена посока ( $\theta, \varphi$ ) и определен спектрален диапазон в спектъра  $\lambda_i + \Delta\lambda$ ,  $L_0(\lambda_i, \theta, \varphi, H_0)$  - спектралната

яркост, регистрирана на повърхността  $H_0$  и  $L(\lambda_i, \theta, \varphi, H)$  – отразената от природното образувание слънчева радиация на височина –  $H$ . Тази зависимост намира приложение и при дефиниране на СКО, Мишев и др., (1987):

$$r(\lambda_i, z_0, \varphi_0, \theta, \varphi) = \frac{L(\lambda_i, z_0, \varphi_0, \theta, \varphi)}{L_0(\lambda_i, z_0, \varphi_0)} \quad (7)$$

където,  $z_0$  е зенитният ъгъл на Слънцето,  $\varphi_0$  е относителният азимутен ъгъл в определена посока ( $\theta, \varphi$ ),  $\theta$  - зенитният ъгъл на наблюдението и определен спектрален диапазон в спектъра  $\lambda_i + \Delta\lambda$ , а  $L_0(\lambda_i, z_0, \varphi_0)$  е яркостта на ортотропна напълно отразяваща повърхност „бял референт”, намираща се при същия условия на облъчване. Този израз се явява и основата както на наземните, така и на космическите спектрометрични ДИ. За „бял референт” са се използвали различни близки до ортотропната повърхност химични съединения, налагани върху стъклени пластини или хартия като магнезиев окис, бариев сулфат и др. При настоящите полета спектрометрични измервания като бял референт е използван Spectralon с известни оптични характеристики, близки до ортотропната повърхност (Beaulieu, 2000). В ДИ често вместо СКО се използва т.нар. коефициент на спектралното алbedo -  $\rho(\lambda_i, z_0, \varphi_0, 2\pi)$ , който се дефинира като отражение на падащия поток към отразения поток върху изследваното природно образувание (Мишев и др., 1987). Спектралното алbedo по своя смисъл се явява интегрирана стойност на СКО за цялата полусфера ( $180^\circ$ ), като най-простото му изчисляване е произведението на СКО на белия референт за съответната дължина на вълната по числото  $\pi$ . Спектралното алbedo, СКО и индикатрисата на отражението –  $\eta$ , са свързани чрез зависимостта, Мишев и др. (1987):

$$r(\lambda_i, z_0, \varphi_0, \theta, \varphi) = \eta(\lambda_i, z_0, \varphi_0, \theta, \varphi) * \rho(\lambda_i, z_0, \varphi_0, 2\pi) \quad (8)$$

Последната зависимост, както отбелязват Мишев, Добрев и др., (1987), е от особено значение при изследване на смесени класове природни образувания, какъвто е случаят с данните от повечето съвременни спътникови системи за ДИ. Те прилагат и уравнението на линейното миксиране на СКО за две природни образувания, което представлява сума от произведенията на процентния дял от площта на природното образувание в пиксела на спътниковата система и неговата СКО. Отчитайки важността на индикатрисата и албедото на природните и антропогенни обекти, са създадени спътникови платформи със спектрометри, заснемащи от различни позиционни ъгли с цел изучаване на позиционните ефекти върху СКО. Такива са Global Change Observation Mission (GCOM)-C със спектрометъра Second Generation Global Imager (SGLI) на Japan Aerospace Exploration Agency (JAXA), заснемащ в три позиционни ъгла:  $-45^\circ$ , nadir, и  $+45^\circ$  по протежение на пътя на заснемане (Suzuki, Ishii et al. 2010). Частично многоъглово заснемане осъществяват и многоканалните радиометри с ниска ПРС: ATSR, AATSR, MISR, AVHRR и MODIS (Vogt, Verstraete, 2009).

Първите спектрометрични спътникови системи водят началото си от подспътниковите експерименти, провеждани синхронно на борда на ПКК „Союз-6”, „Союз-7” и „Союз-8”, със самолетни експерименти с аналогична апаратура (PCC-2) в края на 70-те години на 20-ти век (Виноградов, 1981). През 90-те години NASA и TRW разработват спектрометричен сензор (HSI) за мисията LEWIS, който е бил планиран да заснема 128

канала в диапазона 0.4-1  $\mu\text{m}$  и още 256 канала в областта 0.9-2.5  $\mu\text{m}$  с ширина на каналите съответно 5 и 6.5 nm. Друг подобен спектрометричен радиометър (спектрометър) е FTHSI на MightySat II, разработен от AirForce Research с 256 канала в областта 0.35-1.05  $\mu\text{m}$ . Едва с появата на спътниковите платформи New Millennium Program / Earth Observer (NMP/EO-1) на NASA със спектрометъра Hyperion на борда и CHRIS/PROBA на ESA, изведени в орбита съответно през 1999 и 2001 г., спектрометричните спътникови ДИ навлязоха в реалните граждански и научни приложения (van der Meer, de Jong, 2006). Въпреки дългото планиране и отлагане няколко спектрометрични мисии са в напреднал стадий на своята реализация. Такива са EnMap и Modular Optoelectronic Scanner (MOS) на DLR, High Resolution Imaging Spectrometer (HIRIS) на NASA, Naval Earth Map Observer (NEMO) на военноморските сили на САЩ. За разлика от съществуващите спътникови сензори като: Hyperion и CHRIS/PROBA, NEMO ще бъде с двойно предназначение за военни и граждански нужди, като спектрометърът на борда му – Coastal Ocean Imaging Spectroradiometer (COIS) ще заснема в спектралния диапазон 400-2500 nm и ще има спектрална разделителна способност от 10 nm. Ширината на сцената ще е 30 km, с размер на пиксела от 60 до 30 m, както и подобро отношение сигнал-шум (Signal-to-noise ratio – S/N ratio) в сравнение с предходните подобни системи. Спектрометърът HIRIS е планиран да заснема 192 канала със спектрална разделителна способност от 9.4 до 11.7 nm в различните области на електромагнитния спектър – 0.4-2.5  $\mu\text{m}$ . Планираният Australian Resource Information and Environment Satellite (ARIES) ще има пълно покритие във видимия и близкия ИЧ спектрален диапазон (Visible Near InfraRed - VNIR) 400-1050 nm – с разстояние между каналите 20 nm, и последващо продължение в късовълновия инфрачервен (Short Wave InfraRed – SWIR-2) спектрален диапазон 2000-2500 nm с минимум 16 nm разстояние между каналите, или общо 105 канала (van der Meer, de Jong, 2006). Спътникът OrbView-4, или още изведен като Warfighter, разработван от Orbimage, е планиран да разполага с 1 панхроматичен канал с 1 m ПРС и многоканална система с 4 m ПРС, както и 200 канала в спектралната област 0.4-2.5  $\mu\text{m}$  с 8 m ПРС. За разлика от останалите спектрометри OrbView-4 има възможността да заснема в различни ъгли – с отклонение до 45° от зенитния ъгъл, но за граждански и научни цели ще бъде предоставяна информация само с 24 m ПРС. Едно от актуалните изследвания върху възможностите на бъдещата спътникова мисия Hyperspectral Environment and Resource Observer (HERO) за изследване на сигналите на стрес и нарушения при горите на канадския институт по аеронавтика и космически изследвания – Canadian Aeronautics and Space Institute (CASI), показва слабостите на една такава мисия и очертава възможностите за подобряване на параметрите на мисията с оглед бъдещи изследвания (Peddle, Boulton et al., 2008).

### **Флуоресцентни спътникови дистанционни методи за откриване на сигналите на стрес**

Повече информация относно отклика на стреса върху листата в короните на дърветата може да бъде получена от флуоресцентните емисии на хлорофил-а. Основните дължини на вълните, включени във флуоресценцията и в емисията от зелените листа, когато се облъчват с UV-A радиация, са в синята дължина на вълната 440 nm, в зелената 520 nm, в червената 690 nm и далечната червена дължина на вълната 740 nm. Тези върхове в червената и далечната червена област

са първично асоциирани с флуоресценцията на хлорофил-а, който е директно свързан с фотосинтетичните процеси, докато по-късите емисии в късите дължини на вълните са предоминантно асоциирани с флуоресценцията от други, предимно фенолни, съставки в листата, по-специално ферулни и хлорогенни киселини, свързани с клетъчните стени (Buschmann et al., 2000). При всяка дължина на вълната интензивността на флуоресценцията е повлияна от концентрацията на излъчващата субстанция, вътрешната оптика на листото, включваща фактори, които повлияват частичната ре-абсорбция на флуоресценцията, и по-специално за фотосинтетично свързана флуоресценция, енергийното разпределение между фотосистемите и процесите по затихване и намаляване на енергията в хлоропластите.

На практика суровото количество на флуоресценцията по всяко време е относително безполезен сигнал, тъй като е твърде зависим от осветлението и от структурните характеристики на листото. Следователно е полезно да се нормализират данните и да се извлекат аналози на класическите параметри на хлорофилната флуоресценция, които се получават обикновено, както от флуоресцентни преходи при осветяване (fluorescence transients on illumination) или тези, получени използвайки модулиращи флуоресцентни техники (Maxwell, Johnson, 2000; Malenovsky, Mishra et al. 2009). Обикновено се счита, че най-полезните параметри за флуоресценция са: отношението на променливата на максималната флуоресценция след асимилирането (acclimation) на тъмно (Fv/Fm), който индукира потенциалната максимална ефективност на фотосистема II и квантовите нива (преходи) на фотосистема II, което е дадено посредством отношението на Fv/Fm по време на стабилна фотосинтеза (steady state photosynthesis) (Maxwell, Johnson, 2000). Тези отношения се получават от двойка флуоресцентни изображения, индукиращи вариацията в тези характеристики над повърхността на листата.

Повече изследвания върху хлорофилната флуоресценция са концентрирани на използването на единични точкови измервания, въпреки че през последните години множество флуоресцентни системи за изображения станаха налични за широката общественост (Lichtenthaler, Miede, 1997). Тези системи станаха изключително полезни не само за изследването на фотосинтетичния отклик на стреса, но също за техните приложения за изучаване на голям спектър от биотични стресове, като много цветовете и данните за хлорофилната флуоресценция се използват за демонстрация и отличаване на ранните етапи на инфектирането с гъби, вируси и бактерии, преди симптомите да станат видими в стандартните отражателни изображения (Chaerle et al., 2000). Първата многоканална спътникова мисия, базирана на флуоресценцията, е IBUKI (GOSAT) на JAXA, която е изведена в орбита на 23 януари 2009 г. под международен номер 2009-002A. Първите резултати от флуоресцентните композитни изображения в глобален мащаб за 2009 г., след двегодишна валидация на данните, са оповестени публично от изследователския екип на Goddard Space Flight Center към NASA (Joiner, Yoshida, et al. 2011).

## Заклучение

В заключение на така направения обзор на литературата на настоящия етап на развитието на спътниковите системи за ДИ се оформят следните по-важни проблеми за разпознаване на абиотични стресови ситуации в иглолистни ландшафти: 1). Създаване на повече и с по-добра ПРС спътникови системи за дистанционни изследвания на основата на флуоресценцията; 2). Усъвършенстване на спектралната и ПРС на инфрачервените спътникови ДИ и системи с цел по-ясна идентификация на стресови ситуации, причинени от абиотичните фактори на средата; 3). Създаване на експертни системи, основани на бази от знания и данни от спътникови ДИ, с цел по-бързо и ясно дефиниране и решаване на конкретна стресова ситуация.

## Литература

- Бакланов, А. И. 2009. Системи наблюдения и мониторинга - учебное пособие. Москва, БИНОМ. Лаборатория знаний.
- Башчинов, А. Е., Гурвич, А. С. и др. 1969. Определение геофизических параметров по измерениям теплового радиоизлучения на ИСЗ "Космос-243". ДАН СССР. Г.188: 6.
- Выгодская, Н. Н., Горшкова И. И. Теория и эксперимент в дистанционных исследованиях растительности. Ленинград, Гидрометеоздат, 1987.
- Гарбук, С. В., Гершензон В. Е. 1997. Космические системы дистанционного зондирования Земли. Москва, Издательство А и Б.
- Данилин, И. М., Медведев, Е. М. 2005. Мониторинг лесов в режиме реального времени на основе лазерной локации и цифровой аэро- и космической съемки. Лидерство высоких технологий в таксации и контроле лесопользования. В: Дистанционные методы в лесостроительстве и учете лесов. Приборы и технологии - материалы всероссийского совещания-семинара с международным участием, Красноярск, Института леса им. В.Н. Сукачева СО РАН.
- Израэль, Ю. А., Назаров, И. М. и др., (ред.) 1987. Мониторинг трансграничного переноса загрязняющих воздух веществ. Ленинград, Гидрометеоздат,.
- Кринов, Е. Л. 1947. Спектральная отражательная способность природных образований. Ленинград, Издательство Академии Наук СССР.
- Марджосян, Г. Х. 2000. Природни екокатастрофи и тяхното дистанционно и аерокосмическо изучаване. София, Академично издателство "Проф. Марин Дринов".
- Мишев, Д. Н., Добрев, Т. Б. 1987. Дистанционни методи в геофизиката и геологията - Аерокосмически методи за изследване строежа на Земята. София, ДИ "Техника".
- Сухих, В. И., Синецина, С. Г. 1979. Аэрокосмические методы в охране природы и в лесном хозяйстве. Москва, Лесная промышленность.
- Виноградов, Б. В. 1981. Преобразованная земля - аэрокосмические исследования. Москва, Мысль.
- Куприянов, В. В., В. Г. Прокачева, (ред.) 1976. Спутниковая информация и изучение суши (введение в спутниковую гидрологию). Труды ГГИ. Ленинград.
- Макунина, Г. С. 1978. Антропогенная модификация низкогорного южнотаежного ландшафта в сфере влияния медеплавильного производства. Вестник МГУ Серия Географическая. N 3.
- Соков, М. К., Рожков, А. С. 1975. Динамика сокращения прироста у хвойных деревьев под влиянием промышленных выбросов алюминиевых заводов. Влияние антропогенных и природных факторов на хвойные деревья. Иркутск.
- Badgley, P. C., Centers, C. D., Colvocoresses, A. P. 1968. NASA earth-sensing space flight experiments, Annual Convention, Document ID: 19680040925.
- Beaulieu, J. 2000. Spectralon® Care and Handling Guidelines.
- Buschmann, C., Langsdorf, G., Lichtenthaler, H. K. 2000. Imaging of the blue, green, and red fluorescence emission of plants: an overview. *Photosynthetica*. 38(4): 483-491.
- Chaerle, L., Van Der Straeten, D. 2000. Imaging techniques and the early detection of plant stress. *Trends in Plant Science*. 5(11): 495-501.
- Charles, E., Zyl, J. V. 2006. Introduction to the Physics and Techniques of Remote Sensing, John Wiley & Sons, Inc.
- Idso, S. B., Jackson, R. D. et al. 1981. Normalizing the stress-degree-day parameter for environmental variability. *Agric. Met.* 24: 45-55.
- Franklin, S. E. 2001. Remote Sensing for Sustainable Forest Management, LEWIS publishers - CRC Press LLC.
- Gutman, G., Tarpley, D. et al. 1995. The Enhanced NOAA Global Land Data Set from the Advanced Very High Resolution Radiometer. *Bult. of Am. Met. Soc.* 76(7): 1141-1156.
- Heller, R. C. 1969. Proc. Am. Soc. Photogramm, and Soc. Phologramm. Sci. and Eng. New York, p. 85.
- Henel, R., Conrath, B. 1969. Preliminary results from the interferometer experiment on Nimbus-III. *Science*. 165(3899).
- Joiner, J., Yoshida, Y., Vasilkov, A. P., Yoshida et al. 2011. First observations of global and seasonal terrestrial chlorophyll fluorescence from space. *Biogeosciences*. 8: 637-651.
- Jones, H. G., Schofield, P. 2008. Thermal and Other Remote Sensing Of Plant Stress. // *Gen. Appl. Plant Physiology*. 34 (Special Issue (1-2)): 19-32.
- Lichtenthaler, H. K., Miehe, J. A. 1997. Fluorescence imaging as a diagnostic tool for plant stress. // *Trends in Plant Science*. 2(8): 316-320.
- Malenovsky, Z., Mishra, K. B. et al. 2009. Scientific and technical challenges in remote sensing of plant canopy reflectance and fluorescence. *J. Exp. Bot.* 60(11): 2987-3004.
- Maxwell, K., Johnson, G. N. 2000. Chlorophyll fluorescence - a practical guide. *J. Exp. Bot.* 51: 659-668.
- Murtha, P. A., Watson, E. K. 1974. SO<sub>2</sub> damage of forest recorded by ERTS-1. Proceedings of Third ERTS Symposium, 10-14 Decembre 1973, Washington DC, USA, NASA.
- Peddle, D. R., Boulton, R. B. et al. 2008. Hyperspectral detection of chemical vegetation stress: Evaluation for the Canadian HERO satellite mission. *Canadian Journal of Remote Sensing*. 34(SUPPL. 1).
- Richelson, J. T. 1990. America's Secret Eyes in Space, Harper & Row: 383.
- Suzuki, R., Ishii, R. et al. 2010. Forest Vegetation Analyses by GCOM-C/SGLI Accompanied with Field Data With Field Data. *International Archives of the Photogrammetry, Remote Sensing and Spatial Information Science*. XXXVIII(8): 3.
- van der Meer, F., Jong, S. M. D. (Eds.) Imaging Spectrometry - Basic Principles and Prospective Applications. Remote Sensing and Digital Image Processing, Springer, 2006.
- van der Meer, F., Schmidt, K. S. et al. 2002. New environmental remote sensing systems. In: Environmental Modelling with GIS and Remote Sensing. A. K. Skidmore. London, Taylor & Francis.
- Vogt, P., Verstraete, M. M. 2009. Physics of AnisView. 5.
- Warren, W. B. 1969. Apollo Mission G Spacecraft to Spacecraft VHF Coverage. TRW Report Number 11176-H272-RO-00. 26 June, 1969.
- link – 25 years of satellite imagery over Chernobyl, 2011, ASTRIUM an EADS company: 21. (достъпен на 23.12.2020).