

МОДЕЛИ НА ГЕОСИСТЕМИ И АБИОТИЧЕН СТРЕС В ДИСТАНЦИОННИТЕ ИЗСЛЕДВАНИЯ

Лъчезар Филчев

*Институт за космически изследвания и технологии – Българска академия на науките
e-mail: lachezarh@space.bas.bg*

Ключови думи: *абиотичен стрес, моделиране, геосистеми*

Резюме: *В областта на съвременните дистанционни изследвания се полагат усилия по моделиране на предавателните свойства на атмосферата, както и на отражателните свойства на обектите от земната и акваториалната повърхност. С помощта на тези модели е възможно решаването на права и обратна задача, т.е. генериране на спектрален коефициент на отражение (СКО) във видимата и близката инфрачервена област на спектъра от химични съставки, като пигменти - хлорофил, каротин, водно съдържание, азотно съдържание, и др. и обратно, получаване на химични съставки от СКО и биофизични и биометрични параметри на иглолистната растителна покривка, като листен индекс, височина на дърветата, обиколка на дървостойките, проективно покритие и др.*

MODELS OF GEOSYSTEMS AND ABIOTIC STRESS IN REMOTE SENSING

Lachezar Filchev

*Space Research and Technology Institute – Bulgarian Academy of Sciences
e-mail: lachezarh@space.bas.bg*

Keywords: *abiotic stress, modelling, geosystems*

Abstract: *In the field of modern remote sensing, efforts are made to model the transmission properties of the atmosphere, as well as the reflective properties of objects from the land and water surface. With the help of these models, it is possible to solve a straight and reverse task, i.e. generating a spectral response in the visible and near-infrared area of the spectrum of chemical ingredients, such as pigments - chlorophyll, carotene, water content, nitrogen content, etc. conversely, obtaining chemical ingredients from spectra and biophysical and biometric parameters of coniferous plant cover, such as leaf index, tree height, tree circumference, canopy forest cover, etc.*

Въведение

В областта на дистанционните изследвания (ДИ) се полагат големи усилия по моделиране на предавателните свойства на атмосферата, както и на отражателните свойства на обектите от земната и акваториалната повърхност на земята (Джепа-Петрова, 1985). С помощта на тези модели е възможно решаването на права и обратна задача, т.е. генериране на СКО във видимата и близката инфрачервена област на спектъра от химични конституенти, като пигменти - хлорофил, каротин, водно съдържание, азотно съдържание, и др. и обратно, получаване на химични конституенти от СКО и биофизични и биометрични параметри на иглолистната растителна покривка, като листен индекс, височина на дърветата, обиколка на дървостойките, проективно покритие и др. При отчитане на отражателните характеристики на земната повърхност, важно значение има и индикатрисата на самото отражение на обекта, която може да се изменя значително с промяна на ъгъла на заснемане. Повечето съвременни 3D модели на отражението отчитат индикатрисата на отражение на природните обекти, като дори някои от тях, създават синтезирани изображения на заснетата земна повърхност в

различни точки на наблюдение (заснемане). Трябва да се отчита, че аерофото и спътниковите ДИ в която и да било област на електромагнитния спектър регистрират композитен сигнал от листа, клони и стволоче, корони на дървета, наземна растителна покривка и почви и са засегнати от засенчване поради разлики във височината на дървостойките, обезлистяването, азимутния ъгъл на заснемане, топографията, ориентацията на листата, архитектурата на короните на дърветата и атмосферната турбуленция (Bracher, Murtha, 1994; Franklin, 2001).

Основните биохимични съставки, които се откриват и анализират по спектроскопски и спектрометричен метод в ДИ са: целулоза, хемицелулоза, лигнин, скорбяла, и азотсъдържащи съставки, като протеини и хлорофил. Протеините основно под формата на D-рибулоза 1-5-дифосфат карбоксилаза, са най-обилно представени в листата на зелените растения. На тях се дължи от 30 до 50 % от съдържанието на азот в листата (Elvidge, 1990). Пет основни линии на поглъщане характеризират спектъра във видимата и близката ИЧ област на спектъра. На тези широки линии на поглъщане се дължи общото подобие на спектъра на зелената растителност (Curran et al., 1992). По правило органичните компоненти абсорбират инфрачервената радиация в определени основни честоти на вълните, както в средната, така и в термалната област на ИЧ област от спектъра. Линиите на поглъщане на органичните съставки във видимата и близката ИЧ област се дължат главно на овертонове и хармоники, на фундаменталните честоти на връзките на C-H, N-H и O-H (Curran, 1989). В ултравиолетовата (УВ) и близката ИЧ област, листата абсорбират силно, основно поради разтягането и извиването на химичните връзки между C-H, N-H, C-O, и O-H в самите органични съединения. Електронните преходи на фотосинтетичните пигменти – хлорофил, ксантофил и каротин причиняват поглъщането в областта 400-700 nm, а извиването и разтягането на връзката на O-H във водната молекула и други молекули, причинява абсорбция центрирана в дължините на вълните 970 nm, 1145 nm, 1400 nm и 1940 nm (Curran, 1989). Линиите на поглъщане на хлорофила в спектъра са асоциирани с електронни преходи и се намират на 430 nm и 660 nm (за хлорофил-a) и 460 nm и 640 nm (за хлорофил-b). На съвременният етап в ДИ има няколко групи модели за извличане на информация, за химичния състав на растителността основани на биохимията и спектроскопията.

Емпирични модели

Разработването на емпирични модели с използването на наземна и спътникова информация започва още в края на 80-те и началото на 90-те години на 20-ти век, когато се разработват нови технологии с цел откриване на определени хранителни съставки и стрес в листата, короните на дърветата и цели съобщества (Curran, 1992; Johnson, Willow, 1996). Приложенията на тези модели включват откриване или идентификация на стресова ситуация и идентификация на причинителите на стреса преди и след пораженията върху растителността (Murtha, 1974). Първата стъпка при тези приложения на ДИ е да се заложи експеримент и да се оцени взаимовръзката между отражателните характеристики на листата на наблюдаваното растение и концентрацията на пигменти – хлорофил-a и хлорофил-b, каротин (Blackburn, 1998, 2007a, 2007b, 2008). Промяната в хлорофилното съдържание на листата, е добър индикатор на стресова ситуация, тъй-като докато намалява хлорофилното съдържание на листата, листата съхнат и променят цвета си, което може да бъде регистрирано по спектрометричен начин. Типичен експеримент е този на Bracher и Murtha от 1994 г., чиято бърза наземно-базирана техника за оценка на съдържанието на N, P и хлорофил използва полеви спектрометър монтиран на триножник. За целта се използват млади насаждения от дугласка ела (*Pseudotsuga menziesii*) в парници, където се контролират условията на осветеност и атмосферна влажност (Franklin, 2001). Други подобни изследвания с използването, както на лабораторни, така и на полеви спектрометри са на (Zagolski et al. 1996; Jacquemoud et al. 1995; Asner, 1998), а на ниво корони на дърветата: (Peterson et al. 1987; Wessman et al. 1988; Matson et al. 1994; Gastellu-Etchegory et al. 1995; Zagolski et al. 1996; Martin and Aber, 1997). Въпреки това, дори и при контролиране на всички фактори на средата често се наблюдава свързаност на променливите на средата (например увеличено отражение в зелената област на спектъра с увеличена пигментация на листата). Една от най-простите техники, използвана в ДИ, при анализ на биохимичното съдържание е тази на линейното съвпадение (linear fitting), създадена и предложена още през 1995 г. от Gao and Goetz, като предложението на авторите е използването на тази техника в места, където изследователя няма възможност да проведе целенасочено и обширно изследване по калибрирането на резултатите (Gao, Goetz, 1995).

По-добра разграничителна способност на стресовите ситуации, многоканалните и спектрометричните ДИ имат, ако се вземе в предвид разпределението (структурата и текстурата) на цветовете по листната повърхност. Много болести и/или минерални недостатъци и излишъци показват характерни шарки на цветовете по листата. Например докато азотния

дефицит води до обща загуба на хлорофил (и следователно до пожълтяване на листата), други дефицити водят до ясни шарки, като например: цинковия дефицит водещ до вътрешножилково покафеняване (interveinal browning), магнезиевия дефицит до пожълтяване само в междужилковото пространство, а серния недостиг води до виолетов цвят на жилките. Така например Howard *et al.* (1971) откриват, че отражателната способност на *Pinus ponderosa* нараства в областта 810 nm, поради високото съдържание на мед и медни съединения в почвите (van der Meer, de Jong, 2006). По-късно Birnie, Dykstra (1978), откриват че съобществата на *Pinus contorta* растящи на медно-молибденови минерализации показват повишена отражателна способност около 670 nm, и по-малки разлики около 790 nm. По-обща зависимост между минерализацията на субстрата и по-високата отражателна способност на иглолистните от тревната покривка във видимия диапазон на електромагнитния спектър е открита от (Horler *et al.* 1980). Стресовите ситуации причинени от абиотичните фактори на средата намират израз в промяна на формата на втората производна на СКО на иглолистните - около 733 nm (Merton, 1999).

От направените до момента емпирични изследвания на зависимостите между замърсявания с прахови и аерозолни фракции и нарушения при иглолистните видове с използването на данни от многоканалната спътникова система Landsat едно от първите е това на Vogelmann, Rock (1988), които откриват, че отношението на каналите в средния ИЧ диапазон към близкия ИЧ е диагностично за откриване на нарушения причинени от киселинни дъждове. По-късно Ardo *et al.* (1997) разделят нарушенията в горите на три класа на основата на загубата на иглички в смърчова гора в Чехия използвайки отново данни от Landsat. Класовете на нарушенията при горите са определени на основата на регресионни уравнения между загубата на иглиците в точките на пробоземане и пробонабиране и спектралните канали на Landsat TM. Тяхното изследване спомага да се измери магнитуда на обезлистяването свързан с киселинните дъждове. Подобно е и изследването на Rigina, Baklanov *et al.* (1999) използващо мултitemпорални спътникови изображения за периода от 1978 до 1996 г., и изследващо ефекта от въздушно замърсяване с тежки метали причиняващо значителни по площ нарушения на п-ов. Кола, Русия. В Европа е установено, че съдържанието на глутатион и отношението на каротин/хлорофил намалява с увеличаване на надморската височина и увеличаване на замърсяването с озон O₃ (Omasa, Nouchi *et al.* 2005). Отбелязана е също така обратна корелационна зависимост, между дължината на игличките, дължината на клонките и масата на игличките спрямо концентрацията на замърсители, като Hg, S, F, Pb, и права корелационна зависимост на концентрацията на тежките метали и обезлистяването на короните на дърветата на (*Pinus sylvestris* L.) с r² до 0.81 в металургичните центрове Ангарск, Иркутск и Шелехов на Руската федерация (Mikhailova, Berezhnaya *et al.* 2005).

Към групата на емпиричните модели в ДИ се причисляват и търсенето на уранови находища с помощта на аерогеофизични методи, което обикновено се провежда в мащаби 1:200 000 до 1:25 000. Водещия метод е аерограма-спектрометрията, а спомагателни са аеромагнитния и аероелектрическият метод. В резултат, при наличие на карти на структурните фактори на рудоконтрол, се определят перспективни участъци за наземна проверка на резултатите. На основата на корелационната аеромагнитната карта и на аероелектропроучвателните данни се нанасят зони, хоризонти и оси на повишена електропроводимост, а на структурната карта се нанасят аероспектрометричните данни и контури на участъци с по-високи концентрации на урана от фона (Мишев, Добрев и др. 1987). Замърсяванията на иглолистните с естествени радионуклиди, са изучавани още в началото на 70-те години на 20-ти век с навлизането на гама-спектроскопията и изследванията на концентрациите на продуктите на полуразпада на урана, като радон във въздушните рекогносцировъчни изследвания с цел търсене на нови перспективни уранови находища (Carranza, 2009). Въпреки това, поради силното поглъщане на α , β и γ -лъчите от атмосферата, тези методи не са намерили приложение при спътниковите ДИ. През 80-те години на 20-ти век с навлизането на спътниковите ДИ, някои автори правят опити да обяснят урановите геохимични аномалии свързани с естествените находища на уран. Както отбелязват Aronoff, Collin *et al.* (1985), такива аномалии е възможно да имат външно проявление в иглолистната растителност, дори ако рудното тяло се намира на 400 m дълбочина, посредством циркулиращите подземни води. Същите автори доказват на основата на задълбочени биогеохимични анализи, че черния смърч (*Picea mariana*) е най-активно поглъщащия иглолистен вид за бореалния биом на Канада. Някой от актуалните съвременни приложения на спътниковите ДИ при откриването на уранови находища са свързани с комплексни изследвания на връзката между структурата на рудопроявленията и спектралната яркост на природните обекти по спътникови данни от Landsat (Rajesh, 2008).

Друга група емпирични модели и изследвания се концентрират на разработването на спектрални вегетационни индекси (ВИ), които са нечувствителни към подстилящата

повърхнина, водното съдържание в атмосферата, спектралните аналогии между листата и короните на дърветата. Възможностите на наземните и спътниковите спектрометрични изследвания да регистрират типични абсорбционни линии характерни за наличието на даден химичен елемент или съединение в изследвания обект разкриват нови хоризонти пред изследователите. Така например абиотичните стресови ситуации и техните ефекти, като хлорозата например, са причина за повишена отражателна способност на растителността във видимата област от електромагнитния спектър, поради редуцираното съдържание на хлорофил в игличките. По-късно започва разработване на набор от тесноканални ВИ, от порядъка на 2 nm спектрална РС, които трябва да спомогнат за характеризирането на конкретен тип стресова ситуация или биохимичен конституент. През 1983 г. Колинс използва самолетни спектрометрични данни, и отбелязва че преместването на „червеният ръб“ в спектъра на растителността може да се използва за идентификация на стресова ситуация (van der Meer, de Jong, 2006). По отношение на изследване на бъдещи находища на газ-хидратите са правени тестови изследвания в редица страни при които е установен значително отместване – т. нар. „синьо отместване“ в спектъра с ширина до 10–20 nm. Такива отмествания се наблюдават особено ясно при прекарване на спектрален трансект през даденото газонептено находище, при което се забелязва рязък спад в СКО на природните обекти (Трофимов, 2009).

Комплексното използване на дистанционни и ландшафтно-геохимични методи за изследване на техногенната натовареност в промишлени райони за територията на България е започнало още през 80-те години на миналия век. За изучаване на степента и механизма на замърсяване на почвено-растителната покривка в районите на Девненския промишлен комплекс, СМК „Кремиковци“ и ОЦЗ „Кърджали“ са съставени ландшафтни карти с използване на многоканални и панхроматични изображения (Мишев и др., 1981, 1987; Roumenina, 1991; Spiridonov *et al.*, 1992; Великов и др., 1995). Изображенията са получени от многоканалната камера МКФ-6М и панхроматичната камера MRB, монтирани на борда на самолет-лаборатория АН-30, както и от спътниците ERTS, Landsat и Салют 4. За определяне степента на антропогенно въздействие върху природната среда е използван коефициента на техногенна натовареност. По многоканалните и панхроматични самолетни и спътникови изображения са определени елементарните ландшафти чрез визуално-инструментално дешифриране и контролируема класификация по метода на максималното правдоподобие (maximum likelihood) с използване на системата за интерактивна обработка на изображения 2РААС/300 В. При тези изследвания не са използвани вегетационни индекси, и не са определяни стресовите ситуации. Геоинформационни технологии са използвани при изготвянето на екологична рискова оценка и моделиране на здравния статус на смърчовата растителност в биосферен резерват „Чупрене“ (Руменина, Димитров, 2003; Руменина и др., 2003).

Геометрично-оптични модели

Тази група модели освен останалите входни параметри отчитат и архитектурата на короните на дърветата (Gastellu-Etcheberry and Bruniquel-Pinel, 2001). Голямо тяхно предимство, но същевременно и недостатък, е трудното им използване за решаване на обратната задача – получаване на биохимичните съставляващи от СКО. Началото на моделирането на взаимодействието на листната маса със слънчевата радиация, е положено още с работите на Willstätter и Stoll от 1918 г. (van der Meer, de Jong, 2006). В техния опростен модел на разпространението основан на опитни данни, те разглеждат падащата радиация, като: 1) вертикално падаща към повърхността на плоските епителни клетки, и съответно се отразява от тях; 2) светлина подложена на множество отражения поради разликите в индекса на рефракция, различен за клетъчната стена, водното съдържание в клетката и въздуха. Останалата част от радиацията преминава през листа и е подложена на същите процеси, както и падащата радиация, до пълното поглъщане от лисатата. Поради различията на законите на пречупване и отражение в близкият ИЧ диапазон на спектъра моделите на разпространение и трасиране на ИЧ радиация се основават на различни предположения.

Модели основани на теорията на Кубелка-Мунк (Kubelka-Munk)

Тези модели разглеждат светлината и разпространението ѝ, като дифузен сноп от лъчи падащ, преминаващ или частично поглъщан от дифузен медиум – листата на короните на дърветата. Този модел, както и плоските модели и стохастичните модели, поради общият им теоретичен характер, имат за задача да обяснят общите теоретични постановки при взаимодействието на светлината с листата, но не е възможно да бъдат използвани за решаване на обратната задача, т.е. откриване на химичните съставки и структура на листата (van der Meer, de Jong, 2006).

Отражателни модели

Принципите на тази група модели използвани за определяне на биохимичните съставлящи на растенията са изложени в работите на (Fourty *et al.* 1998; Jacquemoud, Baret, 1990; Jacquemoud, 1993; Jacquemoud, Verdebout *et al.* 1995; Jacquemoud, Bacour *et al.* 2000; Jacquemoud, Verhoef *et al.* 2009; Asner, 1998).

Модели на предавателни функции на атмосферата

Тези модели са конструирани за да моделират предавателната функция на атмосферата предимно във видимата и близката ИЧ област на спектъра, като например SAIL (Jacquemoud, Verhoef *et al.* 2009) и THREEVEG на Myneni, Ross, (1991) и моделите на отражение от листата, като PROSPECT Jacquemoud, Baret (1990) и LIBERTY на Dawson *et al.* (1998). Използват се за директно определяне на съотношението между биохимичното съдържание и спектралните производни на ниво листо или корона на дървото, само и единствено ако биохимичната концентрация, дебелината на листата и характеризирането на архитектурата на короните на дърветата, са изследвани и измерени от изследователя (van der Meer, de Jong, 2006). В изследванията си Gastellu-Etcheberry, Bruniuel-Pinel, (1999) съчетават използването на модела на отражението на короните на дърветата DART Gastellu-Etcheberry, Demarez *et al.* (1996) с PROSPECT за изучаване на съдържанието на лигнин, азот и целулоза в иглолистни култури. Подобни са и изследванията на Dawson *et al.* (1998), които съчетават модела на отражението на короните на дърветата RSADU с LIBERTY за изучаване на бореална иглолистна гора. И двете изследвания показват еднозначно, че спектралната информация съчетана с биохимията на листата, може да бъде сигурно и точно открита на ниво корони на дърветата. Въпреки това и в двете изследвания е отбелязано, че за да има точно и ясно определяне на тези параметри трябва да има *a priori* познание за листния индекс и отражателната способност на подстилащата повърхност. Авторите Ganapol *et al.* (1999) разработват модел на отражението от листата и короните на дърветата наречен LCM2 (Leaf/Canopy Model version 2), за генериране на отражателната способност на растителността, като функция на нейната биохимия, листната морфология (представена от отражателните характеристики на листата), дебелината на листата, почвеното отражение и архитектурата на короните на дърветата.

Литература:

1. Великов, В., Мишев Д., Руменина Е. Космос, ландшафти, екология. Университетско издателство "Св.Св. Кирил и Методий", В. Търново, 1995, с. 141.
2. Джепа-Петрова, В. С. Определяне на някои интегрални параметри на атмосферата по спътникови данни за целите на дистанционните изследвания на Земята от космоса. Дисертация. Единен център за науките на Земята - Централна лаборатория за космически изследвания. София, Българска академия на науките. доктор на физическите науки, 1985, с. 139.
3. Мишев, Д. Н., Добрев, Т. Б. и др. Дистанционни методи в геофизиката и геологията - Аерокосмически методи за изследване строежа на Земята. София, ДИ "Техника", 1987.
4. Руменина, Е., Димитров, В. Пространствено моделиране на здравния статус на горите в резерват "Чупрене". Екологично инженерство и опазване на околната среда, 2003, кн. 3, с. 53–59.
5. Руменина, Е., Любенова, М., Димитров, В. Екологична рискова оценка на смърчовата растителност в биосферен резерват Чупрене чрез пространствено моделиране в ГИС. В: Международна научна конференция "75 години Институт за гората при БАН". Сб. доклади, т. 1. БАН, София, 2003, 61–64.
6. Трофимов, Д. М. Дистанционно зондирование: новые технологии – новые возможности поиска нефти и газа. Геоматика, 2009, N 1, с. 10.
7. Ardo, J., Pilesjo, P. et al. Neural networks, multitemporal Landsat Thematic Mapper data and topographic data to classify forest damages in the Czech Republic. Canadian J. of Remote Sensing, 1997, (23): 217–229.
8. Aronoff, S., E.D. Collin, et al. Biogeochemical Anomalies and Landsat Imagery: A Comparison on the Wollaston Lake Area, Saskatchewan. In: Miscellaneous Report, Saskatchewan Geology Survey, Saskatchewan Energy and Miners, 1985, 85-4: 116–124.
9. Asner, G. P. Biophysical and Biochemical Sources of Variability in Canopy Reflectance. Remote Sensing of Environment, 1998, 64(3): 234–253.
10. Blackburn, G. Spectral indices for estimating photosynthetic pigment concentrations: a test using senescent tree leaves. International Journal of Remote Sensing, 1998, 19(4): 657–675.
11. Blackburn, G. Hyperspectral remote sensing of plant pigments. J. of Experimental Botany, 2007, 58(4): 855.
12. Blackburn, G. A. Wavelet decomposition of hyperspectral data: a novel approach to quantifying pigment concentrations in vegetation. International Journal of Remote Sensing 2007, 28(12): 2831–2855.
13. Blackburn, G. A., Ferwerda, J. G. Retrieval of chlorophyll concentration from leaf reflectance spectra using wavelet analysis. Remote Sensing of Environment, 2008, 112(4): 1614–1632.
14. Bracher, G. A., Murtha, P. A. Estimation of foliar macro-nutrients and chlorophyll in Douglas-fir seedlings by leaf reflectance. Canadian Journal of Remote Sensing, 1994, 20(2): 102–114.

15. Carranza, E. J. M. Geochemical Anomaly and Mineral Prospectivity Mapping in GIS. Handbook of Exploration and Environmental Geochemistry. M. Hale, Elsevier B.V. 11, 2009.
16. Curran, P. J. Remote sensing of foliar chemistry. *Remote Sensing of Environment*, 1989, 30: 271–278.
17. Curran, P. J., Dungan, J. L. et al. Reflectance spectroscopy of fresh whole leaves for the estimation of chemical concentration. *Remote Sensing of Environment*, 1992, 39(2): 153–166.
18. Dawson, T. P., Curran, P. J. et al. LIBERTY--Modeling the Effects of Leaf Biochemical Concentration on Reflectance Spectra. *Remote Sensing of Environment*, 1998, 65(1): 50–60.
19. Elvidge, C. D. Visible and near infrared reflectance characteristics of dry plant materials. *Int. J. of Rem. Sens.*, 1990, 11: 1775–95.
20. Franklin, S. E. *Remote Sensing for Sustainable Forest Management*, LEWIS PUBL./CRC Press LLC, 2001.
21. Fourty, T., Baret, F. On spectral estimates of fresh leaf biochemistry. *Int. J. Rem. Sens.*, 1998, 19(7) 1283–98.
22. Horler, D. N. H., Barber, J., Barringer, A. R. A multi-elemental study of plant surface particles in relation to geochemistry and biogeochemistry. *Journal of Geochemical Exploration*, 1980, 13(1): 41–50.
23. Howard, J. A., Watson, R. D., Hessin, T. D. Spectral reflectance properties of Pinus ponderosa in relation to copper content of the soil - Malachite mine, Jefferson County, Colorado (Ponderosa pine foliage visible and near IR spectra, investigating soil copper contents effect on foliage spectral reflectance). 7th International Symposium on Remote Sensing of Environment, University of Michigan, Ann Arbor, Mich.; United States; 17-21 May 1971. pp. 285–297. 1971.
24. Ganapol, B., L. Johnson, et al. (1999). "LCM 2- A coupled leaf/canopy radiative transfer model." *Remote Sensing of Environment* 70(2): 153–166.
25. Gao, B.-C., Goetz, A. F. H. Retrieval of equivalent water thickness and information related to biochemical components of vegetation canopies from AVIRIS data. *Rem. Sens. of Env.*, 1995, 52(3): 155–162.
26. Gastellu-Etchegorry, J. P., V. Demarez, et al. Modeling Radiative Transfer in Heterogeneous 3-D Vegetation Canopies. *Remote Sensing of Environment*, 1996, 58: 131–156.
27. Gastellu-Etchegorry, J. P., Bruniquel-Pinel, V. A modeling approach to assess the robustness of spectrometric predictive equations for canopy chemistry. *Remote Sensing of Environment*, 2001, 76(1): 1–15.
28. Jacquemoud, S. Inversion of the PROSPECT+ SAIL canopy reflectance model from AVIRIS equivalent spectra: theoretical study. *Remote Sensing of Environment*, 1993, 44(2-3): 281-292.
29. Jacquemoud, S., Baret, F. PROSPECT: A model of leaf optical properties spectra. *Remote Sensing of Environment*, 1990, 34(2): 75–91.
30. Jacquemoud, S., Bacour, C. et al. Comparison of Four Radiative Transfer Models to Simulate Plant Canopies Reflectance: Direct and Inverse Mode. *Remote Sensing of Environment*, 2000, 74(3): 471–481.
31. Jacquemoud, S., Verdebout, J. et al. Investigation of leaf biochemistry by statistics* 1. *Remote Sensing of Environment*, 1995, 54(3): 180–188.
32. Jacquemoud, S., Verhoef, W. et al. PROSPECT + SAIL models: A review of use for vegetation characterization. *Remote Sensing of Environment*, 2009, 113(Supplement 1): S56–S66.
33. Johnson, L., Billow, C. Spectrometry estimation of total nitrogen concentration in Douglas-fir foliage. *International Journal of Remote Sensing*, 1996, 17(3): 489–500.
34. Martin, M. E., Aber, J. D. High spectral resolution remote sensing of forest canopy lignin, nitrogen, and ecosystem processes. *Ecological applications*, 1997, 7(2): 431–443.
35. Matson, P., Johnson, L. et al. Seasonal patterns and remote spectral estimation of canopy chemistry across the Oregon transect. *Ecological Applications*, 1994, 4(2): 280–298.
36. Merton, R. Multi-temporal analysis of community scale vegetation stress with imaging spectroscopy. PhD Thesis-University of Auckland, 1999.
37. Mikhailova, T. A., Berezhnaya, N. S. et al. Complex assessment of forest condition under air pollution impacts. *Plant Responses to Air Pollution and Global Change*. K. Omasa, I. Nouchi, et al. Tokyo, Springer, 2005.
38. Myneni, R. B., Ross, I. U. Photon-vegetation interactions: Applications in optical remote sensing and plant ecology, Springer-Verlag, Berlin and New York, 1991, 565.
39. Murtha, P. A., Watson, E. K. SO₂ damage of forest recorded by ERTS-1. In: *Proceedings of Third ERTS Symposium*, 10-14 Decembre 1973, Washington DC, USA, NASA, 1974.
40. Omasa, K., Nouchi, I. et al. (Eds.) *Plant Responses to Air Pollution and Global Change*. Tokyo, Springer-Verlag, 2005.
41. Peterson, D. L., M. A. Spanner, et al. (1987). "Relationship of thematic mapper simulator data to leaf area index of temperate coniferous forests." *Remote Sensing of Environment* 22(3): 323–341.
42. Rajesh, H. M. Mapping Proterozoic unconformity-related uranium deposits in the Rockhole area, Northern Territory, Australia using landsat ETM+. *Ore Geology Reviews*, 2008, 33(3-4): 382–396.
43. Rigina, O., Baklanov, A. et al. Monitoring of forest damage in the Kola Peninsula, Northern Russia due to smelting industry. *The Science of the Total Environment*, 1999, (229): 147–163.
44. Roumenina, E., Pelova, N., Velikov, V. Aerospace Remote Sensing and Landscape Geochemical Methods of Observation of the Anthropogenic Factor in the Devnja Region. In: *Proc. of International Symposium on Hydro-and Aerodynamics in Marine Engineering*. HADMAR '91, Varna, 1991, 1: 42-1–42-3.
45. van der Meer, F., Jong, S. M. D. (Eds.) *Imaging Spectrometry - Basic Principles and Prospective Applications*. *Remote Sensing and Digital Image Processing*, Springer, 2006.
46. Vogelmann, J. E. Rock, B. N. Assessing forest damage in high-elevation coniferous forests in Vermont and New Hampshire using Thematic Mapper data. *Remote Sensing of Environment*, 1988, 24(2): 227–246.
47. Wessman, C. A., Aber, J. D. et al. Remote sensing of canopy chemistry and nitrogen cycling in temperate forest ecosystems. *Nature*, 1988, 335, 154–156.
48. Zagolski, F., Pinel, V. et al. Forest canopy chemistry with high spectral resolution remote sensing. *International Journal of Remote Sensing*, 1996, 17(6): 1107–1128.