

ВАЛИДИРАНЕ НА ФЕНОЛОГИЧНИТЕ МЕТРИКИ НА РАСТИТЕЛНАТА ПОКРИВКА (MODIS) С ТЕМПЕРАТУРНО- БАЗИРАНИТЕ НАЗЕМНИ МЕТРИКИ ЗА НАЧАЛО НА ВЕГЕТАЦИОННИЯ ПЕРИОД В ЦЕНТРАЛНИ РОДОПИ, 2000-2011Г.

Георги Лечов¹, Ерам Артинян²

¹Аграрен университет, Пловдив, катедра Математика & Физика

²Национален институт по метеорология и хидрология - регионален център, Пловдив
e-mail: letchov@gmail.com

Ключови думи: фенологични метрики, климатични метрики, температурни суми, начало на вегетационен период, логистичен модел, индекс на листната площ

Резюме: Целта на настоящата работа е изследване на връзките между климатичните метрики и фенологичните метрики на растителната покривка за начало на вегетационния период. Температурно- базираните метрики за начало на вегетационния период, при три температурни прага 5°C, 7°C, 10°C са дефинирани въз основа на средните денонощни температури измерени на климатичните станции Хвойна(720м н.в.) и Чепеларе(1150м н.в.) и метеорологичната станция Рожен(1750м н.в.). Тези метрики са сравнени с фенологичните метрики на растителната покривка, за начало на вегетационния период, определени посредством скоростта на изменение на кривината на логистичната крива, описваща изменението на индекса на листната площ през вегетационния период. За целта е използван продукта LAI/ FPAR MODIS. Изследван е периода 2000- 2011г. за района на Централни Родопи. За двата вида метрики са определени температурните суми, при които започва вегетационния период.

VALIDATION OF MODIS SPRING LAND SURFACE PHENOLOGY WITH GROUND BASED TEMPERATURE METRICS IN CENTRAL RHODOPE MOUNTAINS, SOUTH EASTERN EUROPE, 2000-2001

George Letchov¹, Eram Artinyan²

¹Agricultural University, Plovdiv, Dept of Math and Physics

²National Institute of Meteorology and Hydrology - Regional Centre, Plovdiv
e-mail: letchov@gmail.com

Keywords: land surface phenology metrics, temperature-based metrics, growing degree days, green up onset, start of growing season

Abstract: The aim of this study is the relationship between temperature-based metrics and satellite-based spring vegetation phenology metrics in Central Rhodope Mountains. Temperature-based metrics at 5°C, 7°C, 10°C thresholds are defined based on the mean diurnal temperatures at Hvoyna, Chepelare and Rozhen meteorological stations. These metrics are compared with Land Surface Phenology metrics- green up onset, calculated applying curvature change approach to MODIS global LAI/ FPAR product data sets for the period 2000 – 2011. Temperature sums on the day of onset of the growing season for both metrics are calculated.

Въведение

Добре известен е фактът, че сезонните температурни промени и вариации на климата в умерените географски ширини, всяка пролет отключват растежните механизми в растенията и ги управляват целогодишно. Растенията са най-чувствителни към промените на климата и поради тази причина могат да се използват като индикатори на климатичните промени. Малките промени в температурата, водят до промени в настъпване на основни фази на морфологично развитие на растенията, т.е. до промени във фенологичния календар на растенията.

Съществуват два вида метрики за определяне продължителността на вегетационния период в развитието на растителността: климатични и фенологични. Климатичните метрики се дефинират посредством минималните или средните денонощни температури, докато фенологичните метрики регистрират настъпващите морфологични изменения в развитието на растенията: събуждане на листните пъпки, появата на 1-ви лист, разлистване, масов цъфтеж и достигане на зрялост, пожълтяване на листата, и приключване на листопада. Проследяването на тези събития върху големи площи е невъзможно със средствата на традиционната фенология- необходими са голям брой фенологични станции, разположени често пъти в трудно достъпни региони. През последните години възникна ново направление във фенологията, известно като фенология на растителната покривка (Land Surface Phenology -LSP). LSP изучава сезонните изменения на растителната покривка, посредством спътникови дистанционни наблюдения на земната повърхност.

Основните фенологични метрики определени посредством сателитни дистанционни наблюдения през пролетния сезон са [1]: (1) начало на раззеленяването, денят от началото на годината (DOY- Julian day of year) на който се отключва фотосинтетичната активност; (2)стабилизиране на раззеленяването- DOY, когато скоростта на развитие на растителната покривка е максимална; (3)зрялост, DOY, когато раззеленяването достига максимум. Аналогични метрики се въвеждат за описание на периода на листопад. LSP метриците се определят, анализирайки изменението на вегетационните индекси LAI, EVI, NDVI и др.. получени като продукти от сателитните дистанционни наблюдения на растителната покривка. Съществуват различни методи за дефиниране на LSP метриците: като прагови стойности, инфлексни точки, точки свързани със скоростта на изменение на вегетационните индекси.

В последните години има силен интерес към нарастването на продължителността на вегетационния период в Северното полукълбо, в резултат на повишаването на температурата на въздуха, свързано с климатичните промени [2], [3]. Удължаването на вегетационния период се дължи по-скоро на по-ранното настъпване на пролетта, отколкото на закъснение в настъпването на есента. Със средствата на традиционната фенология бе установено, че в Европа разлистването и цъфтежа на растенията настъпват между 1.4–3.1 дена на десетилетие по-рано, и с 1.2–2.0 дена на десетилетие по-рано в Северна Америка [4]. Анализът [5] на връзките между климатичната дефиниция на продължителността на вегетационния период, като температурен праг, приложен към минималната и средната денонощни температури и фенологичните фази, показва че датите на последен пролетен мраз $T_{min} < 0\text{ }^{\circ}\text{C}$ ($<-3\text{ }^{\circ}\text{C}$ и $<-5\text{ }^{\circ}\text{C}$) настъпват по-рано средно с 0.24 (0.23 and 0.32) дена на година. Денят от годината когато средните денонощни температури трайно превишават $5\text{ }^{\circ}\text{C}$ ($7\text{ }^{\circ}\text{C}$ и $10\text{ }^{\circ}\text{C}$) също настъпва по-рано, но с 0.13 (0.21 и 0.09) дена на година.

Целта на настоящето изследване е да сравни климатичните, температурно- базирани метрики за начало на вегетационния период (start of growing season- SGS) и LSP метриците, резултат от дистанционните наблюдения на развитието на РП и да установи връзките между тях.

Данни и метод

Изследван регион

Настоящото изследване е проведено в горските масиви на Централни Родопи (42.0190N, 24.6849E; 42.0263N, 24.6751E). Надморската височина в региона се изменя от 500 до 1900м, като източната част е по-ниска от останалата.

Ниските елевации (500- 800м) се доминират от смесени широколистни листопадни гори *Quercus pubescens*, *Q. virgiliana*, *Carpinus betulus*, *Fr. excelsior L.*, *Tilia* и вечнозелени храсти *Juniperus oxycedrus*, докато на големи височини (над 800м н.в.) доминантни са *Fagus sylvatica*, *Pinus sylvestris* and *Picea*.

Климатични данни

В района има една метеорологична станция и две климатични станции на НИХМ към БАН с продължителни серии измервания, покриващи изследвания период 2000- 2011г.. Това са климатичните станции Хвойна (719м н.в.) и Чепеларе (1150м н.в.) и метеорологичната станция Рожен (175м н.в.). За всяка от станциите са формирани серии от данни включващи средно денонощните температури и сумата на валежите.

Средните денонощни температури за периода 2000- 2011г. са: $9.46\text{ }^{\circ}\text{C}$ (Хвона - Hv), $7.16\text{ }^{\circ}\text{C}$ (Чепеларе- Ch), $5.21\text{ }^{\circ}\text{C}$ (Рожен- Ro). Най-студеният месец е януари, със средни температури, съответно: $-3.7\text{ }^{\circ}\text{C}$ (Hv), $-2.3\text{ }^{\circ}\text{C}$ (Ch), $-0.5\text{ }^{\circ}\text{C}$ (Ro). Максималните средни месечни температури са: $19.6\text{ }^{\circ}\text{C}$ (Hv), $16.6\text{ }^{\circ}\text{C}$ (Ch), $14.7\text{ }^{\circ}\text{C}$ (Ro).

Разпределението на температурните градиенти в региона е отместено в посока на отрицателните градиенти: $-0.6^{\circ}\text{C}/100\text{м}$ до $-0.4^{\circ}\text{C}/100\text{м}$, както температурните инверсии не са рядко явление, особено в началото и края на вегетационния период.

LSP данни

За определяне на началото на вегетационния период е използван продукта FPAR/ LAI (ESDT: MOD15A2) с резолюция 1км и композиран на всеки 8 дена от спектрорадиометъра MODIS на борда на сателитите на NASA - Terra(EOS AM) и Aqua (EOS PM), за периода 2000-2011. Отчетени са флаговете за качество на данните, които съпровождат продукта MOD15A2.

Анализиран са 3 групи от по 5 участъка, всеки включващ по 100ха гори, разположени на надморска височина, близка до тази на трите метеорологични станции. Основен принос във фенологията на РП дава динамиката на широколистните листопадни гори. Те са разпространени до 1500м н.в., В по-високите части, гората е смесена и над 75% от площите са заети от вечнозелена иглолистна растителност, предимно смърч. Ето защо LSP метриците са изследвани за участъци, разположени в широколистния листопаден пояс, до 1500м н.в..

Температурно базираните метрики за начало на вегетационния период, основаващи се на един температурен праг.

Нека T_k е средната денонощна температура за k -тия ден и T_b е праговата температура. За начало на вегетационния период се взема първият от 6 последователни дни със средни температури по-високи от праговата температура, т.е. $T_k > T_b$ [6]. Обикновено $T_b = 5^{\circ}\text{C}$, но често при дефиниране на началото на вегетационния период, в климатологията се използват и други прагови температури. Ето защо, в настоящето изследване сме използвали три температурни прага $T_b = 5, 7$ и 10°C и сме пресметнали SGS за всеки температурен праг, за всяка година и за всяка станция по отделно. Средната надморска височина на участъците е използвана за определяне на температурите на ниво пиксел, като:

$$T_{\text{pixel}} = T_k + (dT/dh) (h_{\text{pixel}} - h_k)$$

където h_k – надморска височина на станция (k), h_{k+1} - надморска височина на станция ($k+1$), h_{pixel} - надморска височина на участъка(пиксела), T_k е температурата от k -та метеорологична станция, (dT/dh) - градиента на температурата между станции (k) и ($k+1$), ($h_k \leq h_{\text{pixel}} \leq h_{k+1}$).

Дефинирането на вегетационния сезон посредством един температурен праг, понякога може да даде подвеждащи резултати [7]. Ето защо при използването на такъв тип метрики се препоръчва предварително изглаждане на данните [5], като се прилага метода на подвижните средни за 7 дневен период. Така изгладените данни са използвани за определяне началото на вегетационния сезон, при трите температурни прага $T_b = 5, 7$ и 10°C .

LSP метрики, получени в резултат на анализ на времевите серии за LAI. За всеки участък е разработен логистичен модел на изменението на LAI (индекса на листната площ), въз основа на продукта MODIS LAI/FPAR. След което, началото на вегетационния период е определено, като денят от годината, в който скоростта на изменение на кривината на логистичната крива достига максимум [1]. Логистичният модел на изменение на индексът на листната площ е от вида:

$$(1) \quad y(t) = \frac{c}{1 + e^{a+bt}} + d, \quad a > 0, b < 0, c > 0, d > 0$$

където t е времето, измервано в дни от началото на годината, $y(t)$ е LAI в момента от време t , a и b са параметри, $c+d$ е максималната стойност на LAI, и d е фонова компонента, обикновено свързана с приноса на вечнозелената растителност. Кривината \mathcal{K} на логистичната крива (1) е:

$$(2) \quad \mathcal{K} = \frac{b^2 cz(1+z)(1+z)^3}{[(1+z)^4 + (bcz)^2]^{3/2}}$$

а скоростта на изменение на \mathcal{K} , т.е. \mathcal{K}' , е [1]:

$$(3) \quad \mathcal{K}' = b^3 cz \left\{ \frac{3z(1-z)(1+z^3)[2(1+z^3) + b^2 c^2 z]}{[(1+z)^4 + (bcz)^2]^{5/2}} - \frac{3z(1-z)(1+z^3)[2(1+z^3) + b^2 c^2 z]}{[(1+z)^4 + (bcz)^2]^{5/2}} \right\}$$

Началото на вегетационния период се определя, намирайки локалните екстремуми на скоростта на изменение \mathcal{K}' на кривината на логистичната крива (1).

температурни суми (degree days- dd). Температурните суми в дните на настъпване на вегетационния период са определени като:

$$(4) \quad TS = \sum_{t_0}^m R_b(x_t)$$

$$(5) \quad R_b(x_t) = \begin{cases} 0 & \text{if } x_t \leq TS_b \\ (x_t - TS_b) & \text{if } x_t > TS_b \end{cases}$$

където m е денят от годината, в който започва вегетационния период, TS е температурната сума в началото на вегетационния период, x_t средната денонощна температура; TS_b е праговата температура и t_0 е денят от началото на годината, от който се започва натрупване на температурните суми, R_b дава градусите натрупани в деня t .

В настоящето изследване $TS_b = 0^\circ\text{C}$, а температурните суми се натрупват от началото на годината, $t_0 = 1$ януари.

Резултати и дискусия

SGS като температурен праг

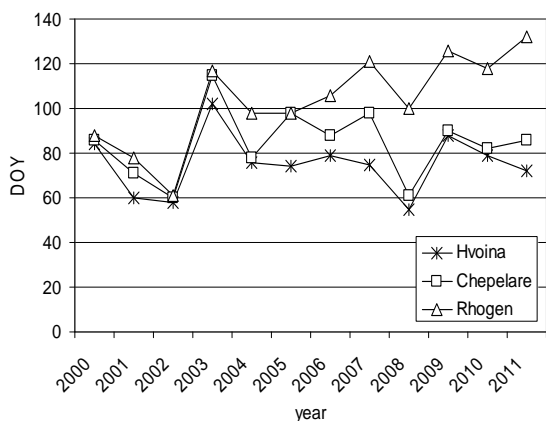
Анализът на стандартната климатична дефиниция за начало на вегетационния активния период, като датата с температури над 5°C в 6 последователни дена показва, че през последното десетилетие (2000- 2011), началото на вегетационния период. се отмества към по-късни дати при станциите на по-големи надморски височини, като на Чепеларе закъснението е с +1.28дена/година, а на Рожен +0.73 дена/година. На станция Хвойна (710м) има слабо изразен тренд към по-ранна пролет (-0.26/дена/година). Както се вижда (Таблица 1), различните температурни прагове използвани за дефиниция на началото на активния сезон, дават различни като посока тенденции. Тези тенденции обаче не са статистически значими, поради голямата вариабилност на началото на активния сезон през годините. Изходните данни, въз основа на които са направени оценките в Таблица 1 са предварително изгладени, прилагайки 7 дневни подвижни средни.

Таблица 1. Начало на вегетационния период (SGS) и температурните суми(TS) (след 1 –ви януари при прагова температура $TS_b = 0^\circ\text{C}$). SGS се дефинира като първият от 6 последователни дни със средни температури по-високи от праговата температура. (SE- стандартната грешка).

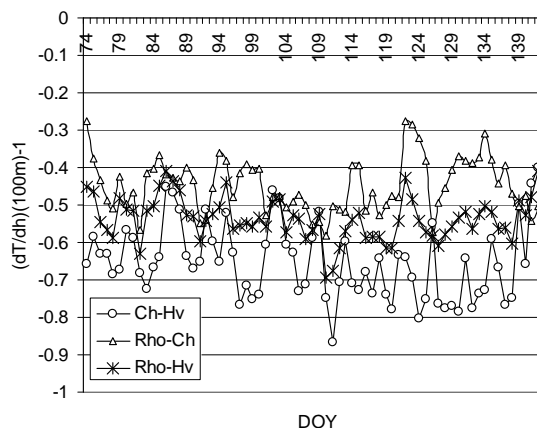
Station	SGS, DOY	SE, days	Trend days/year	R	R ²	F-test	p- value	TS, dd	SE, dd
Hv5	74	3	0.318	0.10	0.01	0.109	0.748	144	16
Ch5	93	4	-0.108	0.03	0.00	0.010	0.921	148	16
Rho5	113	4	1.860	0.53	0.28	3.887	0.077	160	20
Hv7	87	4	-0.528	0.16	0.02	0.250	0.628	220	25
Ch7	105	4	2.073	0.52	0.27	3.782	0.080	216	24
Rho7	125	5	1.734	0.39	0.15	1.779	0.212	226	21
Hv10	105	4	2.035	0.52	0.27	3.728	0.082	370	36
Ch10	131	3	-0.049	0.02	0.00	0.004	0.953	419	37
Rho10	143	5	-2.570	0.56	0.32	4.676	0.056	363	49

С увеличение на надморската височина (710- 1750м), началото на активния сезон закъснява с 38 дена (Таблица 1), т.е. средно с 3.68 дена при увеличаване на надморската височина с 100м . Този резултат се получава и при трите температурни прага използвани за дефиниране на началото на активния сезон, съответно 5, 7 и 10°C . Закъснението е по-голямо във височинния пояс 500- 1200м, и е от 4.2 дена/100м, докато над 1200м закъснението е от 3.31 дена/100м. Трябва да се отбележи, че началото на активния сезон при прагова температура $T_b = 10^\circ\text{C}$, при по- малките надморски височини е по- голямо- 6 дена/100м до 1200м н.в. и само 2 дена/100м над 1200м н.в..

Средните за изследвания период температурни суми TS , необходими за започване на вегетационния период при трите прагови температури, са съответно 151dd (при $T_b = 5^\circ\text{C}$), 221dd (при $T_b = 7^\circ\text{C}$) и 384dd (при $T_b = 10^\circ\text{C}$). Температурните суми са акумулирани при прагова температура от $TS_b = 0^\circ\text{C}$. Необходимите температурни суми, варират слабо с надморската височина. При $T_b = 7^\circ\text{C}$ относителната грешка е 2.28%, като тя е най-голяма 7.95% при $T_b = 10^\circ\text{C}$. Това показва, че трябва да се използват по-ниски температурни прагове при дефиниране на началото на вегетационния период.



Фиг. 1. Начало на вегетационния период при температурен праг $T_b = 5^\circ\text{C}$



Фиг. 2. Средни температурни градиенти ($^\circ\text{C}/100\text{m}$) в началото на вегетационния период (2000- 2011г). Hv- Хвойна, Ch-Чепеларе, Ro- Рожен

начало на вегетационния период, определено посредством дистанционни наблюдения (MODIS LAI data set)

Началото на вегетационния период (t_1), определено анализирайки продукта LAI/FPAR, получен посредством сателитни дистанционни наблюдения на растителната покривка с помощта на спекрорадиометъра MODIS за периода 2000- 2011 година е дадено в Таблица 2. Денят от началото на годината, в който настъпва пролетта е определен като момента от време, в който скоростта на изменение на кривината на логистичната крива достига максимална стойност. Фоновата компонента d в логистичния модел (1) е определена, като средната стойност на индекса на листната площ в периода на покой- месеците декември от предходната година и януари, февруари и средата на март от текущата година. В таблицата са дадени съответните температурни суми (TS) акумулирани при три температурни прага $TS_b = 0^\circ\text{C}$, 5°C и 10°C . В таблицата са представени и сумата на валежите от началото на годината до датата на настъпване на пролетта на трите надморски височини, на които са разположени метеорологичните станции. Началото на активния сезон закъснява с 22 дена на надморска височина Рожен(1750м) спрямо Хвойна (720м), т.е. имаме закъснение от 2.75 дена/100м н.в.. Основната част от закъснението се получава в участъците с по-ниска н.в.. Градиентът между Хвойна и Чепеларе е -4,64 дена/100м, докато между Чепеларе и Рожен е само -0.6 дена/ 100м, като сме отчели факта че изследваните участъци се намират на около 1500м н.в., а не на височината на станция Рожен (1750м). Причините за това са няколко. Фенологията на шитоколистните листопадни гори се различава съществено от фенологията на вечн озелените иглолистни гори. Над 1500м преобладават вечнозелени иглолистни гори, в които широколистната листопадна компонента варира между 0 и 25%. Втората причина са температурните градиенти в региона. На фигура 2 са показани средните за изследвания период температурни градиенти между метеорологичните станции Хвойна, Чепеларе и Рожен в началото на вегетационния период. Температурните градиенти Ch-Hv варират между (-0.61) и (-0.70 $^\circ\text{C}/100\text{m}$) и са по големи от градиентите в по-високата част на планината, където те са от порядъка на (-0.46 $^\circ\text{C}/100\text{m}$), като в периода на реализиране началото на активния сезон (t_1) съгласно дистанционните наблюдения, температурния градиент Ro-Ch е много по-малък, само (-0.33 $^\circ\text{C}/ 100\text{m}$).

Таблица 2. Начало на вегетационния период (t_1), определен посредством дистанционни наблюдения и температурните суми TS в начало на вегетационния период при различни температурни прагове. PP – сумата на валежите до началото на вегетационния период, SE- стандартна грешка, SD- стандартно отклонение.

Метрики	Хвойна			Чепеларе			Рожен		
	mean	SE	SD	mean	SE	SD	mean	SE	SD
t_1	103	4	13	123	4	15	125	3	9
$TS(TS_b = 0^\circ\text{C})$	369	42	147	387	32	111	248	18	63
$TS(TS_b = 5^\circ\text{C})$	115	20	69	105	18	62	57	13	46
$TS(TS_b = 10^\circ\text{C})$	20	6	20	17	5	18	10	6	20
PP. mm	164	18	62	254	29	102	320	32	109

Температурните суми при които започва пролетта са пресметнати при три температурни прага (Таблица 2). Началото на сезона в диапазона елевации 700- 1200м започва при достигане на температурни суми от около 380dd, докато в интервала 1150- 1500м н.в., вегетационния период започва при 248dd., отчетени при прагова температура $TS_b = 0^{\circ}\text{C}$. Праговата температура зависи от вида на растителността и локалната топография и климат. От Таблица 2 се вижда че с увеличаване на праговата температура, вариацията на температурните суми нараства, като при надморски височини под 1150м н.в. вариацията е с постоянна големина и нараства забележимо при 1500м.

Изводи:

Сравняването на температурно базираните метрики за начало на сезона с LSP метриците, получени посредством дистанционни наблюдения на РП показва, че:

- през последното десетилетие 2000- 2011 не се наблюдават статистически значими тенденции към отместване началото на вегетационния период към по-ранни или по-късни дати; Началото на вегетационния период варира силно, независимо от типа метрики.

- температурно базираните дефиниции за начало на активния сезон дават 3.7 дена на 100м закъснение в SGS, което е с 1.5 дена на 100м по голямо в сравнение със закъснението пресметнато въз основа на дистанционните наблюдения.

- на по-малките надморски височини (700 - 1200м), където РП е по-хомогенна и преобладават широколистните листопадни гори и двата вида метрики дават съпоставими резултати- закъснение от 4.65м на всеки 100м. Изключение прави само началото на активния сезон при температурен праг $T_b = 10^{\circ}\text{C}$ с градиент от 6 дена на 100м при елевации до 1200м н.в..

- температурните суми, при които настъпва началото на сезона в рамките на даден тип метрика не зависят от надморската височина, с изключение на началото на сезона на 1500м н.в. определено посредством дистанционни наблюдения. Тук се наблюдава значимо различие, което по всяка вероятност се дължи на наличието на съществени масиви вечнозелена растителност. Това налага допълнителни наблюдения на място.

Заклучение

Слабите връзки между температурно- базираните метрики и LSP метриците, показват че температурата не е единствената причина, която определя настъпването на пролетта в региона. По всяка вероятност имат значение дните с мраз предшествуващи началото на вегетационния период, както и влагообезпечеността. При сравняването на двата вида метрики трябва да се има в предвид хомогенността на РП. В смесените горски масиви LSP метриците силно се изкривяват и правят невъзможно валидирането на LSP метриците [8], сравнявайки ги с температурно базираните метрики.

Литература:

1. Zhang, X, Friedl MA, Schaaf C. B., Strahler A. H., Hodgesa J. C. F., Feng Gaoa, Reed B. C., Huete A. (2003). Monitoring vegetation phenology using MODIS, *Remote Sensing of Environment* 84 (2003) 471–475.
2. Keeling, CD, Chin FJS, Whorf TP. (1996). Increased activity of northern vegetation inferred from atmospheric CO₂ measurements. *Nature* 382: 146–149.
3. Myneni, RB, Keeling CD, Tucker CJ, Asrar G, Nemani RR. (1997). Increased plant growth in the northern high latitudes from 1981 to 1991. *Nature* 386: 698–702.
4. Walther, GR, Post E, Convey P, Menzel A, Parmesan C, Beebee TJC, Fromentin JM, Hoegh-Guldberg O, Bairlein, F. (2002). Ecological responses to recent climate change. *Nature* 416: 389–395.
5. Menzel, A., Jakobi G, Ahas R, Scheifinger H and Estrella N., (2003). Variations of the climatological growing season (1951–2000) in Germany compared with other countries, *Int. J. Climatol.* 23: 793–812, DOI: 10.1002/joc.915
6. Project team ECA&D, Royal Netherlands Meteorological Institute KNMI. EUMETNET/ECSN optional programme: 'European Climate Assessment & Dataset (ECA&D)', Algorithm Theoretical Basis Document (ATBD), Version : 10.4, Project number: EPJ029135, Date : September 19, 2011
7. Brinkmann W A R. 1979. Growing season length as an indicator of climate variations? *Climatic Change* 2: 127–138.
8. Fisher, J. I., Richardson A. D. and Mustard J. F. (2007). Phenology model from surface meteorology does not capture satellite-based greenup estimations, *Global Change Biology*, 13, 707–721