

Метод определения фенологических характеристик растительного покрова на основе временных рядов спутниковых данных

Т.С. Миклашевич, С.А. Барталев

Институт космических исследований РАН, Москва, 117997, Россия

E-mail: limires@d902.iki.rssi.ru

Современные спутниковые системы, осуществляющие глобальное наблюдение Земли с высоким временным разрешением, позволяют получать ряды регулярных измерений спектрально-отражательных свойств земной поверхности для оценки фенологических характеристик сезонной динамики растительного покрова. Существующие алгоритмы оценки фенологических характеристик растительного покрова в большинстве случаев не обладают необходимой универсальностью. Во-первых, они предполагают выбор в качестве индикатора наступления определенной фазы сезонного развития растительного покрова абсолютного или относительного порогового значения некоторого параметра, зависящего, в общем случае, от климатических и метеорологических условий и, следовательно, обладающего географической изменчивостью. Во-вторых, имеющиеся алгоритмы анализа временных рядов спутниковых данных, как правило, не учитывают возможное наличие нескольких выраженных локальных экстремумов сезонной динамики растительности. Предложенный в настоящей работе метод определения фенологических характеристик растительности на основе временных рядов спутниковых данных обладает свойствами пространственной адаптивности и в значительной мере свободен от вышеуказанных недостатков.

Ключевые слова: дистанционное зондирование, растительный покров, фенологические характеристики, временные ряды, вегетационные индексы, MODIS

Одобрена к печати: 23.10.2015
DOI: 10.21046/2070-7401-2016-13-1-9-24

Введение

Разработка методов классификации и оценки состояния растительного покрова является одним из основных направлений исследований в области ДЗЗ (Барталев, Лупян, 2013). Наблюдения за сезонным развитием растений проводятся в интересах сельского, лесного и охотничьего хозяйства, а также исследований в области глобальных изменений климата и его влияния на наземные экосистемы. Спутниковые измерения спектральных коэффициентов яркости (СКЯ) и получаемые на их основе значения вегетационных индексов (ВИ), позволяют описывать сезонную динамику различных типов растительного покрова, в частности, с использованием различного рода фенологических признаков (Медведева и др., 2010). Одним из необходимых условий определения фенологических характеристик растительного покрова (дат наступления различных фенологических фаз, продолжительности вегетационного периода и других) является наличие временных рядов данных непрерывных спутниковых наблюдений достаточно высокого временного разрешения.

Исходные спутниковые данные, как правило, проходят предварительную обработку, направленную на устранение шумов, обусловленных несовершенством регистрирующей аппаратуры, влиянием атмосферы, геометрическими искажениями и т.д. В результате фильтрации эффектов влияния облачности и снежного покрова временные ряды ВИ имеют пропуски в данных. Поэтому для анализа сезонной динамики состояния растительного покрова часто проводится дополнительная обработка данных, включающая в себя фильтрацию выбросных значений, заполнение пропусков и сглаживание временных рядов (Плотников и др., 2014; Eklundh, Jönsson, 2012).

Фенологические характеристики, такие как даты начала (the start of growing season – SOS) и окончания вегетационного сезона (the end of growing season – EOS), его длина (the growing season length – GSL), дата наступления максимума ВИ (the maximum of growing season – MGS), накопленное весеннее значение ВИ (Lambert et al., 2013), сезонная амплитуда (Eklundh, Jönsson, 2012) и некоторые другие, широко используются при решении задач дистанционного зондирования растительного покрова.

Информация о дате начала вегетационного сезона характеризуется наиболее широкой практической востребованностью при решении задач агрометеорологии. В агрометеорологической практике начало вегетационного сезона часто устанавливается по дате достижения некоторой минимально достаточной для роста растений температуры воздуха. В качестве такого рода пороговой температуры воздуха может приниматься, например, величина 10°C (Шкляев и др., 2012). Распространение получил и такой метод (Frich et al., 2002), согласно которому начало роста определяется как дата, после которой в течение пяти дней средней температура воздуха превышает 5°C. Однако, температура воздуха – не единственный фактор, влияющий на SOS. В частности, в аридных регионах, где наличие влаги является основным лимитирующим фактором роста растений, начало вегетационного сезона определяется в первую очередь выпадением осадков (Страшная и др., 2014).

При использовании данных ДЗЗ в качестве даты начала вегетационного сезона часто принимается первый день года, соответствующий началу восходящего тренда во временном ряду значений ВИ (Kuenzer et al., 2015). На данный момент разработано множество алгоритмов поиска SOS. В большинстве случаев они основаны на пороговых методах, когда в качестве даты SOS принимается момент достижения заданного значения ВИ.

Один из подходов (White et al., 1997) к определению даты SOS по данным ДЗЗ основан на анализе следующего преобразования временного ряда значений нормализованного разностного вегетационного индекса NDVI (Normalized Difference Vegetation Index):

$$NDVI_{ratio,t} = \frac{NDVI_t - NDVI_{min}}{NDVI_{max} - NDVI_{min}}, \quad (1)$$

где t – номер дня, а $NDVI_{max}$ и $NDVI_{min}$ – соответственно, максимальные и минимальные значения индекса в году. Полученный в результате такого преобразования временной ряд имеет диапазон значений 0 – 1, нижняя и верхняя границы которого соответствуют состояниям наблюдаемого участка земной поверхности при минимальном и максимальном развитии зеленой растительности внутри вегетационного сезона. К полученному таким образом временному ряду применяется метод половинной амплитуды, в котором SOS определяется как пересечение порога в 0,5 $NDVI_{ratio}$. Известен подход (Kogan, 1995) предполагающий использование в формуле (1) в качестве параметров $NDVI_{max}$ и $NDVI_{min}$ многолетних значений максимума и минимума ВИ. Модификации данного метода могут также использовать различные значения порога для $NDVI_{ratio}$ (Lu et al., 2015; Atzberger et al., 2013). Программный продукт TIMESAT (Eklundh and Jönsson, 2012), предназначенный для обработки временных рядов спутниковых данных, предоставляет возможность определения основных фенологи-

ческих характеристик с использованием формулы (1). По умолчанию начало вегетационного сезона в программе TIMESAT соответствует нулевому значению $NDVI_{ratio}$, однако пользователь может задавать значение $NDVI_{ratio}$ самостоятельно. Указанный программный продукт используется, например, в исследованиях климатических изменений (Bhandari et al., 2012), в частности, для установления зависимости фенологических характеристик от климатических факторов (Prabakaran et al., 2013; Balzter et al., 2007).

Метод половинной амплитуды хорошо зарекомендовал себя в задачах, связанных с сельским хозяйством (Плотников и др., 2010). Однако величину относительного порога ВИ для каждой конкретной задачи необходимо подбирать индивидуально, о чем говорит значительное количество модификаций описанного метода. В статье (Chen et al., 2014) представлен более гибкий подход, основанный на совместном использовании данных космических и наземных наблюдений на тестовых участках для построения карты базового уровня развития вегетации для основных экосистем изучаемой территории. Полученная карта используется для установления пространственно адаптивных критериев определения SOS и EOS. Определение фенологических характеристик таким методом позволяет повысить уровень их точности, однако требует большого количества входных данных.

Существуют и другие методы поиска даты SOS по временным рядам данных ВИ. Так, известны подходы (Wang et al., 2014), при которых фенологические характеристики SOS и EOS принимаются соответствующими датам наибольшей межгодовой вариабельности ВИ, а также максимуму первой производной и наибольшему относительному изменению значения ВИ. Эффективным способом определения даты начала вегетации является метод последовательного двойного роста (Медведева и др., 2008). В качестве начала сезона выбирается момент, после которого вегетационный индекс испытывает прирост за два или более последовательных промежутка времени. В этой группе методов не используются пороговые значения, а фенологические характеристики определяются, исходя из анализа формы кривой сезонной динамики ВИ. Для здоровой растительности с выраженной сезонностью такой подход хорошо работает и может применяться в задачах глобального масштаба. Но в случае, когда внутренние колебания индекса высоки и кривая ВИ имеет нескольких локальных экстремумов, максимальная скорость изменения его значения не обязательно соответствует весне, и для детектирования SOS требуется дополнительный анализ временного ряда (Медведева и др., 2011).

Проблеме поиска максимального значения ВИ внутри вегетационного сезона в научной литературе уделяется меньшее внимание, и чаще всего выбирается наибольшее значение индекса за период наблюдения (Lambert et al., 2013). Однако известно (Atzberger et al., 2013), что при наличии более одного цикла развития растительности в календарном году форма временного ряда ВИ может иметь многомодальный характер, усложняющий поиск момента наступления максимума.

В данной работе приведено описание универсального алгоритма определения фенологических признаков растительности, таких как SOS, EOS, GSL и MGS, на основе анализа временных рядов спутниковых данных в динамическом окне.

Алгоритм определения фенологических характеристик

Предлагаемый в настоящей работе метод определения фенологических характеристик растительного покрова, логическая схема которого приведена на *рис. 1*, основан на анализе временных рядов значений ВИ и включает в себя следующие основные этапы:

- исключение из анализа нетипичных для растительного покрова временных рядов ВИ на основе анализа формы аппроксимирующего полинома второй степени;
- поиск положения и определение значения максимума ВИ внутри вегетационного сезона, учитывая возможность влияния таких факторов как весенние и осенние вариации ВИ и многомодальность кривой сезонной динамики;
- определение SOS и EOS, путем поиска интервалов максимальных скоростей роста и регрессии (от лат. regressio – движение назад) ВИ растительности в динамическом окне.

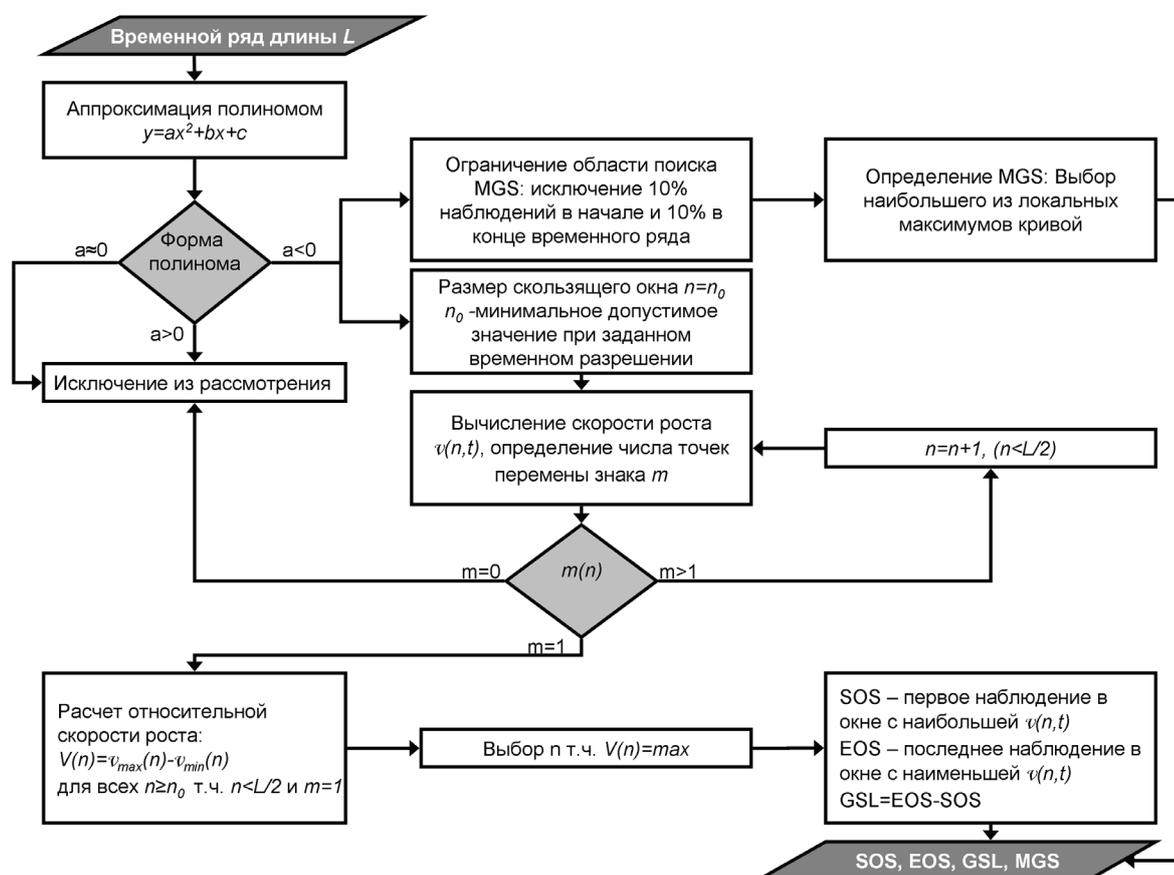


Рис. 1. Логическая схема алгоритма определения фенологических характеристик растительного покрова

На вход алгоритма подается временной ряд некоторого вегетационного индекса длиной L . Типичная форма кривой сезонной динамики ВИ для зеленой растительности представлена на *рис. 2*. Зависимость значений ВИ в первом приближении можно описать уравнением полинома второй степени $y = ax^2 + bx + c$, где x – номер дня года (day of year – DOY), y – значение ВИ, a , b , c – коэффициенты полинома.

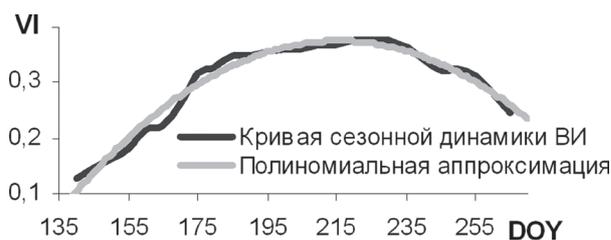


Рис. 2. Кривая сезонной динамики ВИ, аппроксимированная полиномом второй степени

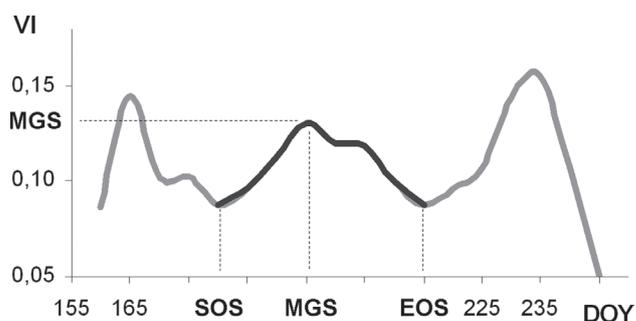


Рис. 3. Временной ряд значений ВИ для мохово-травяного болота

Для зеленой растительности первый коэффициент аппроксимирующей функции должен быть отрицательным, т.е. левая ветвь параболы описывает стадию ее роста, а правая – стадию регрессии. Объекты, аппроксимирующей полином для которых стремится к прямой либо имеет положительный первый коэффициент, демонстрируют нехарактерное для растительного покрова поведение. Так себя ведут, например, находящиеся под паром сельскохозяйственные поля, открытые горные породы и грунты, водные объекты. На основе этого свойства случаи, в которых оценка фенологических характеристик теряет смысл, исключаются из рассмотрения на первом этапе алгоритма.

Для аппроксимации временных рядов применяется метод деформируемого многогранника Нелдера-Мида (Nelder, Mead, 1965), основанный на итеративном изменении координат вершин многогранника в пространстве коэффициентов уравнения $y = ax^2 + bx + c$. Отличаясь быстродействием и надежностью, метод позволяет не рассчитывать градиенты функции и пригоден для негладких зависимостей.

На втором этапе алгоритма определяется значение максимума кривой вегетационного индекса. Для временного ряда, изображенного на рис. 2, поиск максимума – простая задача, сводящаяся к выбору наибольшего ВИ. Однако для представленной в качестве примера на рис. 3 кривой, имеющей многомодальный характер, проблема поиска максимума ВИ внутри вегетационного сезона решается не столь однозначно.

Промежуток, содержащий искомые моменты фенологического развития растительности в данном случае, существенно короче периода наблюдений свободной от снежного покрова земной поверхности. При этом весенний и осенний пик ВИ имеют значения, существенно превышающие реальный максимум вегетации. Это объясняется спецификой чувствительного к влагосодержанию коротковолнового вегетационного индекса SWVI (Short Wave Vegetation Index) (Hardisky et al., 1983), используемого в данном примере. На рис. 3 проиллюстрирована ситуация, когда верхний слой мохово-травяного болота переувлажняется вследствие таяния снега и выпадения осадков. В сочетании со слабо развитым растительным покровом это приводит к появлению высоких значений SWVI в начале и в конце сезона. Подобные выбросы и пики ВИ в весенний период могут возникать и в случаях беглых лесных пожаров или вследствие недостаточной фильтрации эффектов влияния снежного покрова на земной поверхности.

Для предупреждения появления возможных ошибок, связанных с аномалиями в весенне-осенний период, в алгоритме осуществляется ограничение области поиска максимума ВИ внутри вегетационного сезона путем исключения 10% наблюдений в начале и такого же отрезка в конце временного ряда, после чего выбирается наибольший из локальных максимумов кривой.

Поиск характеристик SOS и EOS в алгоритме осуществляется методом максимума первой производной, т.е. в некотором скользящем окне n ищется наибольшая и наименьшая величина прироста значений вегетационного индекса во временном ряду $v(n,t)$. Так как временной ряд наблюдаемых значений является дискретным с наличием локальных экстремумов, в формуле расчета производной:

$$f'(x_0) = \lim_{\Delta x \rightarrow 0} \frac{f(x_0 + \Delta x) - f(x_0)}{\Delta x},$$

где в качестве Δx , используется отрезок временного ряда в несколько точек наблюдения, то есть некоторое скользящее окно. Таким образом, для поиска моментов начала и окончания периода вегетации применяется следующий набор условий:

$$v(n,t) = \frac{VI(n,t+n) - VI(n,t)}{n},$$

$$t_{SOS} = \max(v(n,t)),$$

$$t_{EOS} = \min(v(n,t)) + n;$$

где VI – значение вегетационного индекса, t – номер дня в году, n – размер скользящего окна.

Рисунок 4 иллюстрирует результаты работы алгоритма поиска моментов SOS и EOS. Значения t в максимуме $v_{\max}(n)$ и минимуме $v_{\min}(n)$ функции скорости роста определяют первое наблюдение в скользящем окне, содержащим SOS и EOS, соответственно. При этом моменту начала роста присваивается первое измерение, а моменту окончания сезона – последнее измерение в соответствующем окне.

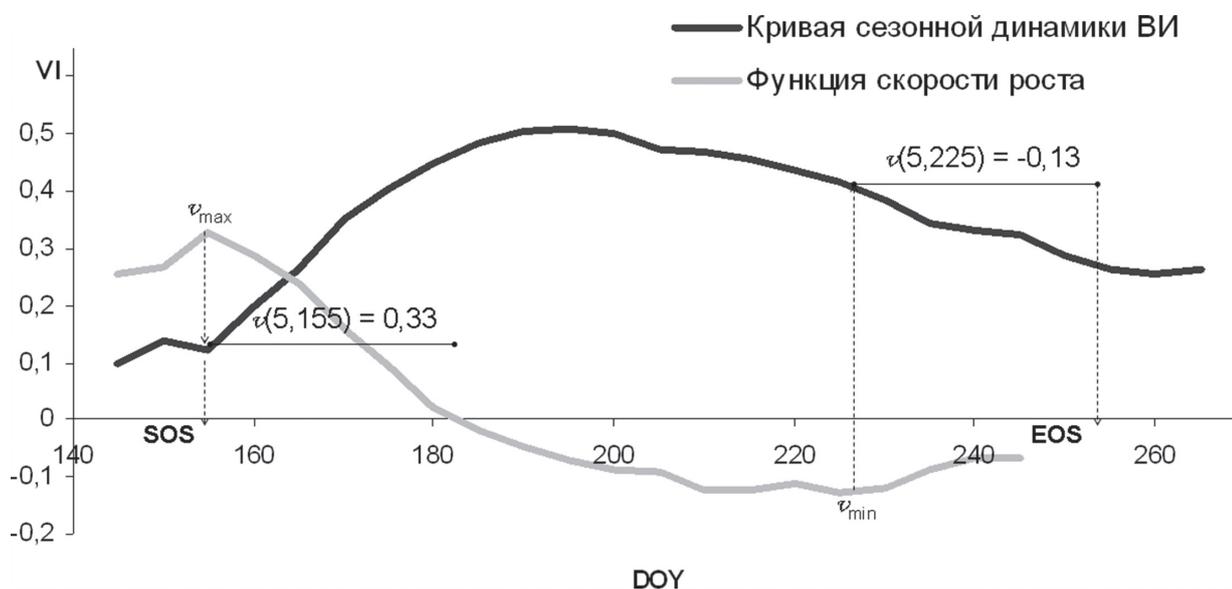


Рис. 4. Иллюстрация работы алгоритма поиска SOS и EOS

Положение экстремумов и число точек перемены знака m функции $v(n, t)$ зависит от выбора параметра n . Для исключения ошибок, связанных с многомодальностью временных рядов ВИ (рис. 3, 5) необходимо выбрать такой размер окна, для которого $m=1$, что соответствует числу экстремумов полинома второй степени. С другой стороны, слишком большое n будет приводить к тому, что SOS и EOS будут совпадать с моментами начала и окончания наблюдения. В этой связи величина окна не должна превышать половину длины временного ряда. Третьим критерием выбора величины окна является относительная суммарная скорость роста $V(n)$, достигающая своего максимума при совпадении размера динамического окна n со средней продолжительностью фаз роста и регрессии ВИ во временном ряду (формула 2, первое условие). Таким образом, наилучший выбор параметра n обеспечивается следующим набором условий:

$$\begin{aligned} V(n) &= v_{\max}(n) - v_{\min}(n), \\ m &= 1, \\ n &< L/2. \end{aligned} \tag{2}$$

Экспериментальная проверка метода

Апробация алгоритма определения фенологических характеристик растительности на основе анализа временных рядов проведена на территории Западно-Сибирской равнины. В качестве исходных данных использованы построенные на основе очищенных от влияния облачности и снежного покрова данных MODIS пространственного разрешения 250 м вегетационные индексы NDVI, PVI (Richardson and Wiegand, 1977) и SWVI, наряду со значениями СКЯ в ближнем инфракрасном диапазоне NIR. Период спутниковых наблюдений охватывает 2014 г. При анализе результатов использованы разработанные на основе данных MODIS карты растительного покрова России (Барталев и др., 2011). Предложенный алгоритм реализован в виде программного модуля для приложения Sputnik (Егоров и др., 2004).

Преимуществом разработанного алгоритма является использование скользящего окна, размер которого подбирается в соответствии с особенностями временного ряда. На рис. 5 проиллюстрирован пример работы алгоритма в случае двухмодальной кривой сезонной динамики SWVI.

На фоне общей динамики ВИ провал в его значениях внутри вегетационного сезона имеет большую значимость, однако абсолютная его величина незначительна (13% от MGS). Иными словами, временной ряд на рис. 5 содержит один вегетационный цикл, а наличие двух выраженных максимумов кривой не связано с межсезонными явлениями, являясь следствием естественных колебаний ВИ, вызванных, например, кратковременным изменением погодных условий. В табл. 1 приведен анализ зависимости результата поиска фенологических характеристик от величины окна n .

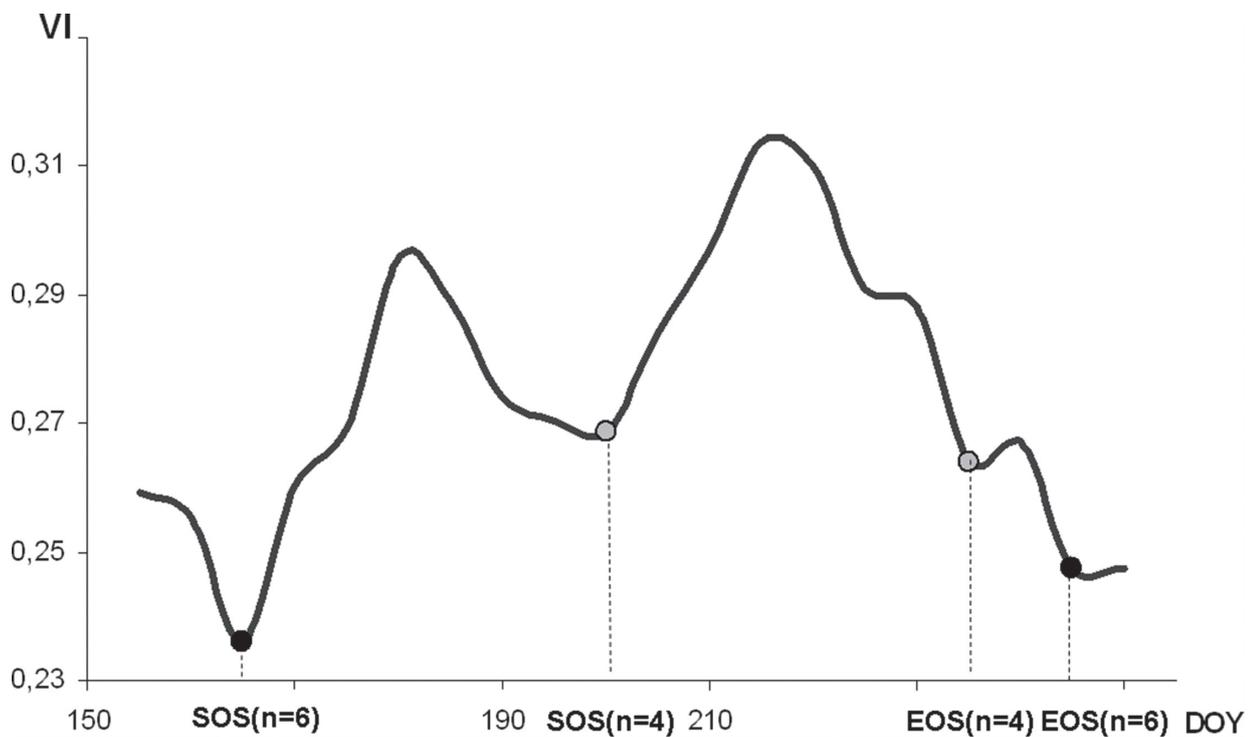


Рис. 5. Соответствующая болоту кривая значений SWVI с указанием ошибочно ($n=4$) и правильно ($n=6$) выявленных дат SOS и EOS

Таблица 1. Зависимость результатов поиска SOS и EOS от размера окна расчета скорости роста ВИ

n	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12	13	14	15
SOS, t	165	190	190	165	165	165	165	165	165	155	165	165	190
EOS, t	235	235	245	245	250	250	250	235	235	245	245	235	235
GSL, t	70	45	55	80	85	85	85	70	70	90	80	70	45
$V(n) \times 10$	1,06	1,03	1,02	1,03	0,99	0,97	0,97	1,02	1,06	0,97	1,01	1,06	1,03
m	3	3	3	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1

Временной ряд в рассматриваемом примере содержит 20 наблюдений с шагом в 5 дней, начиная с 155 дня по 250 день календарного года. Согласно условиям (2) размер адаптивного скользящего окна должен быть больше 5, так как при $n < 6$ число точек перемены знака $m > 1$ (второе условие), и меньше 10 при длине временного ряда $L = 20$ (третье условие). Первое условие в формуле (2) для $n \in [6, 9]$ выполняется при достижении функции $V(n)$ максимума для $n = 6$. Действительно, рис. 5 показывает, что значения SOS и EOS при $n = 6$ являются границами вегетационного периода.

На рис. 6, 8 представлено пространственное распределение значений SOS, а на рис. 10 – значений MGS на различных участках Западной Сибири в 2014 году. В эксперименте использовались временные ряды с 7-дневным временным разрешением. На рис. 7, 9 и 11 приведены для сравнения соответствующие фрагменты редуцированной до шести классов карты растительного покрова.

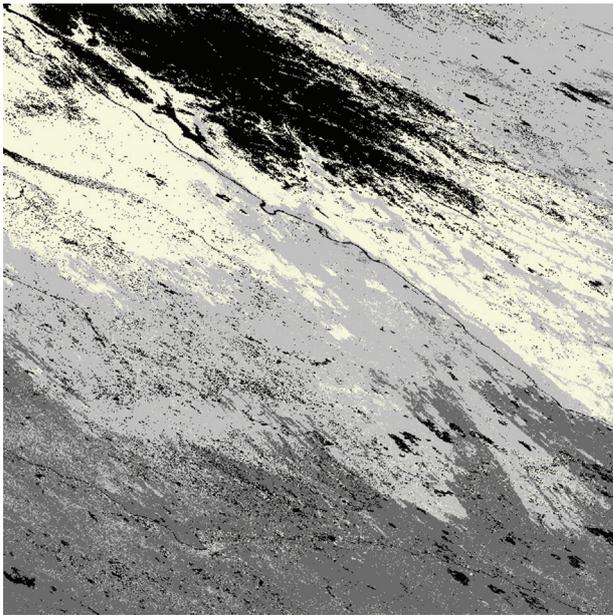


Рис. 6. Распределение значений SOS на территории Западной Сибири

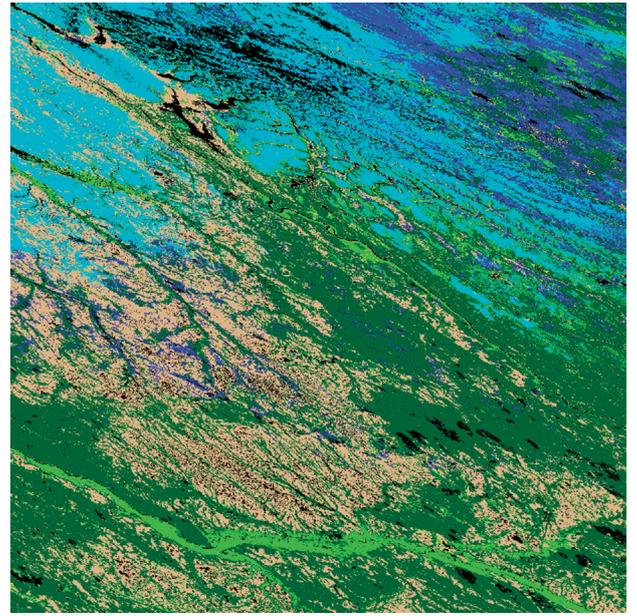


Рис. 7. Соответствующий рисунку 6 фрагмент карты растительного покрова

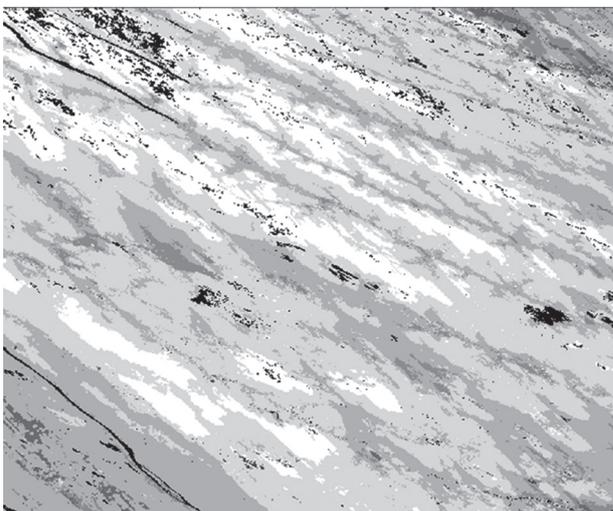


Рис. 8. Распределение значений SOS, восточные окрестности реки Енисей

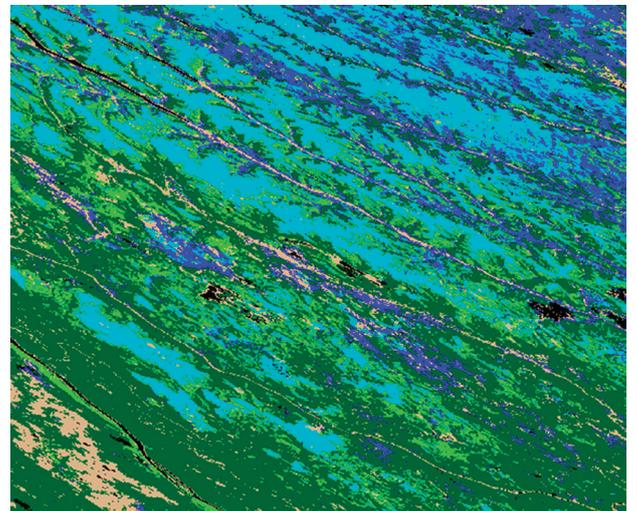


Рис. 9. Соответствующий рисунку 8 фрагмент карты растительного покрова

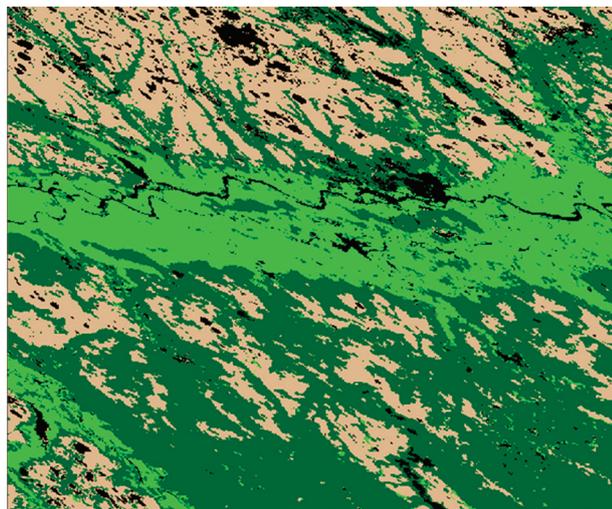
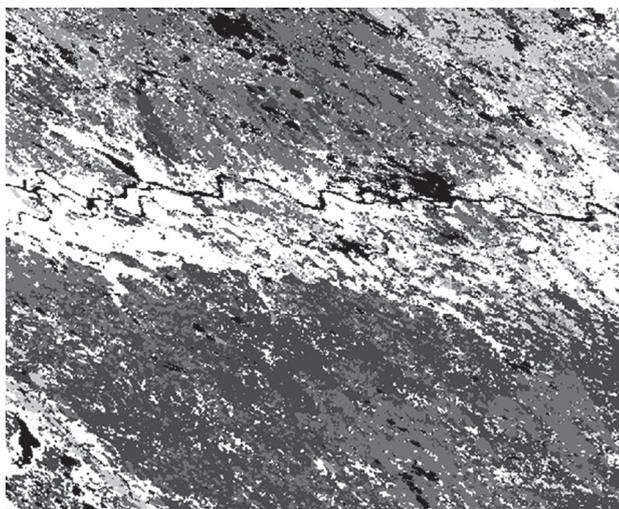


Рис. 10. Распределение значений MSG, долина реки Обь

Рис. 11. Соответствующий рисунку 10 фрагмент карты растительного покрова

Согласно А.Г. Исаченко (Исаченко, 1991), на территории Западно-Сибирской равнины начальная фаза вегетации для южной тундры должна лежать во временном промежутке $105 < \text{SOS} \leq 135$. Для тайги интервал наступления SOS лежит в рамках $150 < \text{SOS} \leq 216$. В промежутке располагается лесотундра и северная тайга. Рисунок 6 иллюстрирует возможности выделения различных природных зон, используя в качестве признака дату начала вегетационного сезона. Сравнение получаемых результатов с рис. 7 показывает на качественном уровне хорошее соответствие между пространственным распределением различных интервалов SOS и расположением природных зон.

На карте растительного покрова класс «травянистая растительность» включает в себя и прибрежную растительность, для которой характерно смещение кривой сезонной динамики ВИ и высокие значения MGS по сравнению с другими классами растительности. Это хорошо видно на рис. 10 на примере поймы реки Обь.

На рис. 12–15 приводятся результаты оценки SOS, EOS и MGS в виде гистограмм соответствующих характеристик для лесов (рис. 12), болот (рис. 13) и сельскохозяйственных угодий (рис. 14). На рис. 15 приведены результаты оценки искомых характеристик, полученные при разном временном разрешении рядов данных. Диаграммы получены путем деградации временных рядов с более высоким временным разрешением до получения сопоставимых категорий.

При сравнении работы алгоритма с использованием различных ВИ рассматриваются временные ряды с семидневным разрешением. Из рисунков видно, что гистограммы распределений в целом согласованы. Наблюдаемые отклонения оценок фенологических характеристик в значительной мере могут быть объяснены различным физическим содержанием

используемых ВИ. В частности, наблюдаются отклонения в поведении чувствительного к содержанию воды вегетационного индекса SWVI от общей тенденции в сторону увеличения DOY. В целом, *рис. 15* демонстрирует, что увеличение временного шага не привело к существенному искажению результатов оценки значений всех трех фенологических признаков.

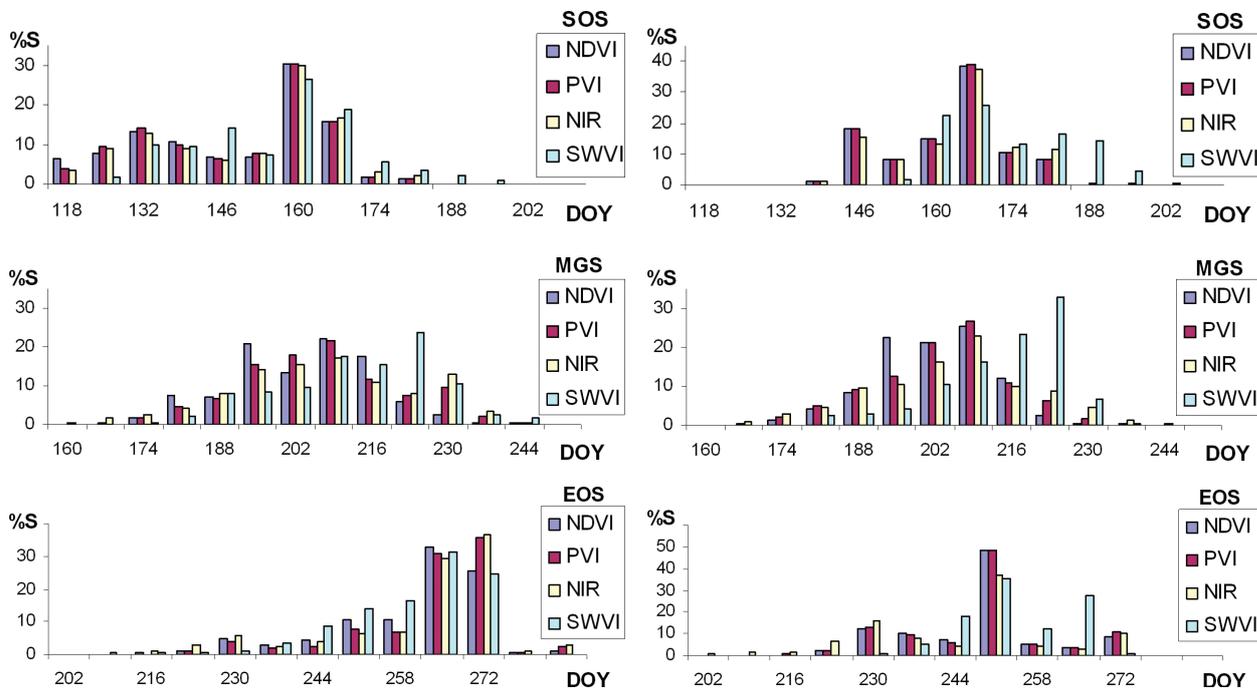


Рис. 12. Распределение значений SOS, MGS и EOS для лесов

Рис. 13. Распределение значений SOS, MGS и EOS для сельхозугодий

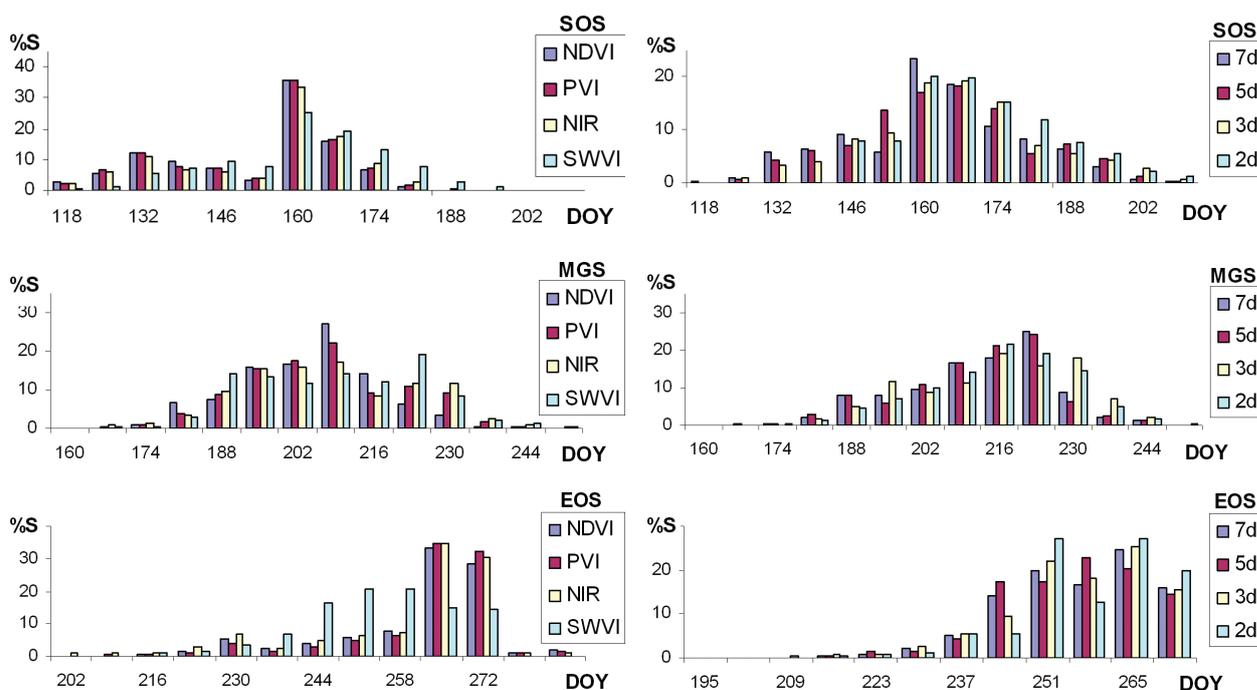


Рис. 14. Распределение значений SOS, MGS и EOS для болот

Рис. 15. Распределение значений SOS, EOS и MGS при разном временном разрешении наблюдений

Для оценки качества работы алгоритма определения значения максимума ВИ внутри вегетационного сезона использованы временные ряды SWVI для участков болот и заболоченных территорий, на которых часто наблюдаются многомодальные кривые сезонной динамики ВИ (рис. 3, 5). С этой целью на соответствующих указанных типам земного покрова участках методом неконтролируемой классификации ISODATA было выделено 30 кластеров, для каждого из которых были усреднены значения SWVI и получена оценка указанных величин в визуально выделенных сезонных максимумах ВИ. Сравнение этих значений с полученными описанным в работе методом и осредненными по кластерам значениями приведено на рис. 16.

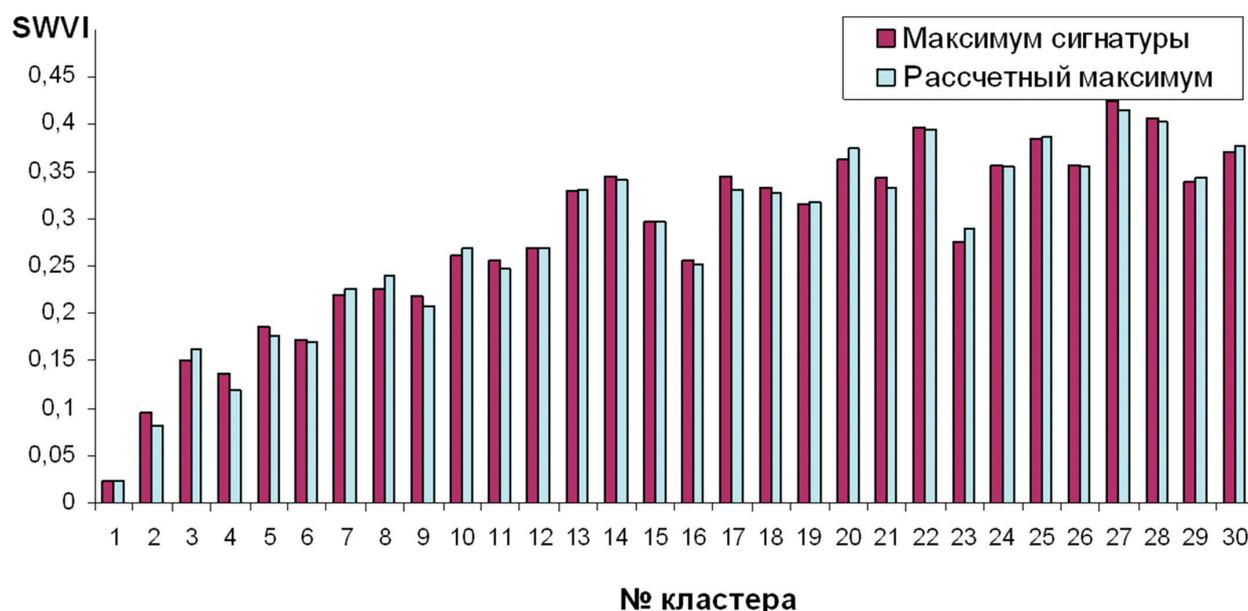


Рис. 16. Соответствие максимумов SWVI для сигнатур кластеров болот (бордовый) и усредненных для каждого кластера расчетных максимумов (голубой)

Как было указано выше, для индекса SWVI распространены ситуации, когда значение абсолютного максимума во временном ряду выше, чем значение максимума внутри вегетационного сезона. Однако диаграмма на рис. 16 показывает, что значения максимумов полученных расчетным образом довольно близки с аналогичными значениями для сигнатур кластеров, причем тенденции к завышению значения расчетного максимума ВИ не наблюдается. Таким образом, можно сделать вывод, что результат определения значения (а, следовательно, и положения) характеристики MGS не подвергается искажению вследствие влияния весенне-осенних аномалий.

Сравнивая фенологические характеристики, полученные при использовании указанных ВИ с одной стороны, для одного индекса с разным разрешением – с другой и значения ВИ для максимума вегетации, определяют средний разброс значений и величина стандартного отклонения (табл. 2).

Из таблицы видно, что моменты начала и окончания вегетации слабо зависят от выбора ВИ, максимальный разброс значений в среднем составляет две точки временного ряда,

а стандартное отклонение составляет одно наблюдение во временном ряду. При этом положение максимума ВИ внутри вегетационного сезона имеет больший разброс, что объясняется спецификой индексов. С другой стороны, при использовании одного вегетационного индекса с разным временным разрешением, наименьшая относительная ошибка детектирования приходится именно на дату наступления максимума ВИ, причем значение максимума, из эксперимента, проиллюстрированного на *рис. 16*, составило 4,5%.

Таблица 2. Разброс значений и стандартное отклонение детектирования SOS, EOS и MGS при варьировании ВИ и временного разрешения рядов спутниковых данных

Вариации значений фенологических характеристик при использовании разных ВИ			Вариации значений фенологических характеристик при разном временном разрешении			MGS(VI)
Шаг временного ряда	Стандартное отклонение	Разброс значений	Дни	Стандартное отклонение	Разброс значений	Стандартное отклонение
SOS	1,0	2,2	SOS	6,7	13,0	4,5%
MGS(date)	1,7	3,7	MGS(date)	2,9	5,5	
EOS	1,0	2,2	EOS	8,6	14,4	

Заключение

В работе представлен метод определения фенологических характеристик растительного покрова, таких как даты максимума, начала и окончания вегетации, а также длительности вегетационного сезона на основе анализа временных рядов спутниковых данных. Предложенный метод отличается от известных подходов, основанных на поиске экстремумов функции скорости роста вегетационных индексов, использованием скользящего окна, размер которого является динамическим параметром алгоритма. Итеративный подход к выбору размера скользящего окна позволяет подбирать окно определения скорости роста, совпадающее по величине с продолжительностью фазы развития (и регрессии) растительности в каждом конкретном случае, и, как следствие, использовать предложенный подход при анализе временных рядов значений вегетационных индексов, имеющих многомодальную форму. Кроме того, разработанный алгоритм включает в себя этапы обработки временных рядов, существенно снижающие уровень шума на безрастительных территориях.

Необходимым условием использования алгоритма является достаточный для описания сезонной динамики растительности набор входных данных и исключение ситуаций наблюдения более одного вегетационного сезона за рассматриваемый промежуток времени. Результаты апробации описанного метода на территории Западно-Сибирской равнины показали высокую стабильность определения значений фенологических характеристик при

варьировании величины временного разрешения исходных данных и вегетационного индекса. Проведен сравнительный анализ работы алгоритма на разных типах растительного покрова и продемонстрирована возможность использования полученных характеристик для выявления природных зон и описания особенностей сезонной различных типов растительного покрова.

Исследование выполнено за счет гранта Российского научного фонда (проект №14-17-00389) в Федеральном государственном бюджетном учреждении науки Институте космических исследований Российской академии наук.

Литература

1. *Барталев С.А., Егоров В.А., Ершов Д.В., Исаев А.С., Лупян Е.А., Плотников Д.Е., Уваров И.А.* Спутниковое картографирование растительного покрова России по данным спектрорадиометра MODIS // Современные проблемы дистанционного зондирования Земли из космоса. 2011. Т. 8. № 4. С. 285–302.
2. *Барталев С.А., Лупян Е.А.* Исследования и разработки ИКИ РАН по развитию методов спутникового мониторинга растительного покрова // Современные проблемы дистанционного зондирования Земли из космоса. 2013. Т. 10. № 1. С. 197–214.
3. *Егоров В.А., Ильин В.О., Лупян Е.А., Мазуров А.А., Прошин А.А., Флитман Е.В.* Возможности построения автоматизированных систем обработки спутниковых данных на основе программного комплекса XV_SAT // Современные проблемы дистанционного зондирования Земли из космоса. 2004. Выпуск 1. С. 431–436.
4. *Исаченко А. Г.* Ландшафтоведение и физико-географическое районирование: Учеб. М.: Высш. шк., 1991. 366 с.
5. *Медведева М.А., Барталев С.А., Лупян Е.А., Матвеев А.М., Толпин В.А., Пойда А.А.* Возможности оценки момента наступления вегетационного сезона на основе спутниковых и метеорологических данных // Современные проблемы дистанционного зондирования Земли из космоса. 2008. Выпуск 5. Т. 2. С. 313–321.
6. *Медведева М.А., Елсаков В.В., Савин И.Ю., Барталев С.А.* О связи фенологического развития растительности таежной зоны с величиной NDVI, определенной по спутниковым данным // Современные проблемы дистанционного зондирования Земли из космоса. 2010. Т. 7. № 1. С. 319–329.
7. *Медведева М.А., Савин И.Ю., Барталев С.А., Лупян Е.А.* Использование данных NOAA-AVHRR для выявления многолетней динамики растительности Северной Евразии // Исследования Земли из космоса. 2011. № 4. С. 55–62.
8. *Плотников Д.Е., Барталев С.А., Лупян Е.А.* Признаки распознавания пахотных земель на основе многолетних рядов данных спутникового спектрорадиометра MODIS // Современные проблемы дистанционного зондирования Земли из космоса. 2010. Т. 7. № 1. С. 330–341.
9. *Плотников Д.Е., Миклашевич Т.С., Барталев С.А.* Восстановление временных рядов данных дистанционных измерений методом полиномиальной аппроксимации в скользящем окне переменного размера // Современные проблемы дистанционного зондирования Земли из космоса. 2014. Т. 11. № 2. С. 103–110.
10. *Страшная А.И., Барталев С.А., Максименкова Т.А., Чуб О.В., Толпин В.А., Плотников Д.Е., Богомолова Н.А.* Агрометеорологическая оценка состояния озимых зерновых культур в период прекращения вегетации с использованием наземных и спутниковых данных на примере Приволжского федерального округа // Труды гидрометеорологического научно-исследовательского центра Российской Федерации. 2014. № 351. С. 85–107.
11. *Шкляев В.А., Ермакова Л.Н., Шкляева Л.С.* Особенности долговременных изменений характеристик вегетационных периодов в Пермском крае // Географический вестник Метеорология. 2012. Т. 2. № 21. С. 68–73
12. *Atzberger C., Klisch A., Mattiuzzi M., Vuolo F.* Phenological metrics derived over the european continent from NDVI3G data and MODIS time series. // Remote Sens. 2013. Vol. 6. P. 257–284.
13. *Balzer H., Gerard B., Weedon G., Grey W., Combal B., Bartholome E., Bartalev S.A., Los S.* Coupling of Vegetation Growing Season Anomalies with Hemispheric and Regional Scale Climate Patterns in Central and East Siberia // Journal of Climate. 2007. Vol. 20. No. 15. P. 3713–3729.
14. *Bhandari S., Phinn S., Gill T.* Preparing Landsat Image Time Series (LITS) for Monitoring Changes in Vegetation Phenology in Queensland, Australia // Remote Sensing. 2012. Vol. 4. No. 6. P. 1856–1886
15. *Chen W., Foy N., Olthof I., Zhang Y., Fraser R., Latifovic R., Poitevin J., Zorn P., McLennan D.* A biophysically based and objective satellite seasonality observation method for applications over the Arctic // International Journal of Remote Sensing. 2014. Vol. 35. No. 18. P. 6742–6763.
16. *Eklundh L., Jönsson P.* TIMESAT 3.1 - Software Manual. Lund University, 2012. 82 p.
17. *Frich P., Alexander L.V., Della-Marta P., Gleason B., Haylock M., Klein Tank A.M.G., Peterson T.* Observed Coherent Changes in Climatic Extremes during the Second Half of the Twentieth Century // Climate Research. 2002. Vol. 19. No. 3. P. 193–212.
18. *Hardisky M.A., Klemas V., Smart R.M.* The influence of soil salinity, growth form, and leaf moisture on the spectral radiance of *Spartina alterniflora* canopies // Photogrammetric Engineering and Remote Sensing. 1983. Vol. 49. P. 77–83.

19. Kogan F.N. Droughts of the late 1980s in the United States as derived from NOAA polar-orbiting satellite data // Bulletin of the American Meteorological Society. 1995. Vol. 76. No. 5. P. 655–668.
20. Kuenzer C., Dech S., Wagner W. Remote Sensing Time Series: Revealing Land Surface Dynamics // Remote Sensing and Digital Image Processing. Springer, 2015. 441 p.
21. Lambert J., Drenou C., Denux J.P., Gérard B., Chéret V. Monitoring forest decline through remote sensing time series analysis // GIScience and Remote Sensing. 2013. Vol. 50. Issue 4. P. 437–457.
22. Lu L., Kuenzer C., Wang C., Guo H., Li Q. Evaluation of Three MODIS-Derived Vegetation Index Time Series for Dryland Vegetation Dynamics Monitoring // Remote Sens. 2015. Vol. 7. No. 6. P. 7597–7614.
23. Nelder J.A., Mead R. A simplex method for function minimization // Computer Journal. 1965. Vol. 7. P. 308–313.
24. Prabakaran C., Singh C.P., Panigrahy S., Parihar J.S. Retrieval of forest phenological parameters from remote sensing-based NDVI time-series data // Current Science. 2013. Vol. 105. No. 6. P. 795–802.
25. Richardson A.J., Wiegand C.L. Distinguishing vegetation from soil background information // Photogrammetric Engineering and Remote Sensing. 1977. Vol. 43. P. 1541–1552.
26. Wang H., Dai J., Ge Q. Comparison of Satellite and Ground-Based Phenology in China's Temperate Monsoon Area // Advances in Meteorology, 2014. 10 p.
27. White M.A., Thornton P.E., Running S.W. A continental phenology model for monitoring vegetation responses to inter-annual climatic variability // Glob. Biogeochem. Cycles. 1997. Vol. 11. No. 2. P. 217–234.

Method for estimating vegetation cover phenological characteristics from satellite data time series

T.S. Miklashevich, S.A. Bartalev

*Space Research Institute RAS, Moscow 117997, Russia
E-mail: limires@d902.iki.rssi.ru*

Available satellite systems provide global observations of the Earth with high temporal resolution. This allows us to obtain regular measurement series of the earth surface spectral reflective properties required for evaluating the phenological characteristics of vegetation cover seasonal dynamics. Most existing algorithms for estimating vegetation cover phenological characteristics do not have the necessary flexibility. Firstly, they assume an absolute or relative threshold of some parameter (which usually depends on climatic and meteorological conditions and thus has geographical variability) to be an indicator of the onset of a particular phase of vegetation cover seasonal development. Secondly, existing algorithms for the analysis of satellite data time series generally do not take into account possible presence of several distinct local extrema of vegetation seasonal dynamics. The proposed method for determining vegetation phenological characteristics based on satellite data time series has the properties of spatial adaptability and is largely free from the above drawbacks.

Keywords: remote sensing, vegetation cover, phenological characteristics, time series, vegetation index, MODIS

*Accepted: 23.10.2015
DOI: 10.21046/2070-7401-2016-13-1-9-24*

References

1. Bartalev S.A., Egorov V.A., Ershov D.V., Isaev A.S., Lupyan E.A., Plotnikov D.E., Uvarov I.A., Sputnikovoe kartografirovaniye rastitel'nogo pokrova Rossii po dannym spektrometriya MODIS (Mapping of Russia's vegetation cover using MODIS satellite spectroradiometer data), *Sovremennye problemy distantsionnogo zondirovaniya Zemli iz kosmosa*, 2011, Vol. 8, No. 4, pp. 285–302.
2. Bartalev S.A., Lupjan E.A., Issledovaniya i razrabotki IKI RAN po razvitiyu metodov sputnikovogo monitoringa rastitel'nogo pokrova (R&D on methods for satellite monitoring of vegetation by the Russian Academy of Sciences' Space Research Institute), *Sovremennye problemy distantsionnogo zondirovaniya Zemli iz kosmosa*, 2013, Vol. 10, No. 1, pp. 197–214.
3. Egorov V.A., Il'in V.O., Lupjan E.A., Mazurov A.A., Proshin A.A., Flitman E.V., Vozmozhnosti postroeniya avtomatizirovannykh sistem obrabotki sputnikovykh dannykh na osnove programmnoy kompleksa XV_SAT (The possibility of building automated systems for satellite data processing on the basis of software XV_SAT), *Sovremennye problemy distantsionnogo zondirovaniya Zemli iz kosmosa*, 2004, Issue 1, pp. 431–436.
4. Isachenko A.G., *Landshaftovedenie i fiziko-geograficheskoe raionirovaniye* (Landscape science and physical-geographical zoning), Moscow: Vysshaya shkola, 1991, 366 p.
5. Medvedeva M.A., Bartalev S.A., Lupyan E.A., Matveev A.M., Tolpin V.A., Poida A.A., Vozmozhnosti otsenki momenta nastupleniya vegetatsionnogo sezona na osnove sputnikovykh i meteorologicheskikh dannykh (The possibility of estimating the onset of the growing season based on satellite and meteorological data), *Sovremennye problemy distantsionnogo zondirovaniya Zemli iz kosmosa*, 2008, Vol. 5, No. 2, pp. 313–321.

6. Medvedeva M.A., Elsakov V.V., Savin I.Ju., Bartalev S.A., O svyazi fenologicheskogo razvitiya rastitel'nosti taezhnoj zony s velichinoj NDVI, opredelennoj po sputnikovym dannym (About the correlation between vegetation phenological dynamics of northern taiga and satellite based NDVI values), *Sovremennye problemy distantsionnogo zondirovaniya Zemli iz kosmosa*, 2010, Vol. 7, No. 1, pp. 319–329.
7. Medvedeva M.A., Savin I.Ju., Bartalev S.A., Lupjan E.A., Ispol'zovanie dannyh NOAA-AVHRR dlja vyjavleniya mnogoletnej dinamiki rastitel'nosti Severnoj Evrazii (Usage of NOAA-AVHRR data for detection of vegetation dynamics in Northern Eurasia), *Issledovanija Zemli iz kosmosa*, 2011, No. 4, pp. 55–62.
8. Plotnikov D.E., Bartalev S.A., Lupyay E.A., Priznaki raspoznavaniya pakhotnykh zemel' na osnove mnogoletnykh ryadov dannykh sputnikovogo spektrometra MODIS (The recognition features to map arable lands based on multi-annual MODIS Earth observation data), *Sovremennye problemy distantsionnogo zondirovaniya Zemli iz kosmosa*, 2010, Vol. 7, No. 1, pp. 330–341.
9. Plotnikov D.E., Miklashevich T.S., Bartalev S.A., Vosstanovlenie vremennykh ryadov dannykh distantsionnykh izmerenii metodom polinomial'noi approksimatsii v skol'zyashchem okne peremennogo razmera (Using local polynomial approximation within moving window for remote sensing data time-series smoothing and data gaps recovery), *Sovremennye problemy distantsionnogo zondirovaniya Zemli iz kosmosa*, 2014, Vol. 11, No. 2, pp. 103–110.
10. Strashnaja A.I., Bartalev S.A., Maksimenkova T.A., Chub O.V., Tolpin V.A., Plotnikov D.E., Bogomolova N.A., Agrometeorologicheskaja ocenka sostojaniya ozimyh zernovykh kul'tur v period prekrashheniya vegetatsii s ispol'zovaniem nazemnykh i sputnikovyx dannykh na primere Privolzhskego federal'nogo okruga (Agrometeorological assessment of winter grain crops during the growing season termination using ground and satellite data on the example of Volga Federal district.), *Trudy gidrometeorologicheskogo nauchno-issledovatel'skogo centra Rossijskoj federacii*, 2014, No. 351, pp. 85–107.
11. Shklyayev V.A., Ermakova L.N., Shklyayeva L.S., Osobennosti dolgovremennykh izmenenii kharakteristik vegetatsionnykh periodov v Permskom krae (Features of long-term changes of parameters of the vegetative periods in the Perm edge), *Geograficheskii vestnik Meteorologiya*, 2012, Vol. 2. No. 21, pp. 68–73.
12. Atzberger C., Klisch A., Mattiuzzi M., Vuolo F., Phenological metrics derived over the european continent from NDVI3G data and MODIS time series, *Remote Sens.*, 2013, Vol. 6, pp. 257–284.
13. Balzter, H., Gerard, B., Weedon G., Grey W., Combal B., Bartholome E., Bartalev S.A., Los S., Coupling of Vegetation Growing Season Anomalies with Hemispheric and Regional Scale Climate Patterns in Central and East Siberia, *Journal of Climate*, Vol. 20, No. 15, 2007, pp. 3713–3729.
14. Bhandari S., Phinn S., Gill T., Preparing Landsat Image Time Series (LITS) for Monitoring Changes in Vegetation Phenology in Queensland, Australia, *Remote Sensing*, 2012, Vol. 4, No. 6, pp.1856-1886.
15. Chen W., Foy N., Olthof I., Zhang Y., Fraser R., Latifovic R., Poitevin J., Zorn P., McLennan D., A biophysically based and objective satellite seasonality observation method for applications over the Arctic, *International Journal of Remote Sensing*, 2014, Vol. 35, No. 18, pp. 6742–6763.
16. Eklundh L., Jönsson P., TIMESAT 3.1 - Software Manual, *Lund University*, 2012, 82 p.
17. Frich P., Alexander L.V., Della-Marta P., Gleason B., Haylock M., Klein Tank A.M.G., Peterson T., Observed Coherent Changes in Climatic Extremes during the Second Half of the Twentieth Century, *Climate Research*, 2002, Vol. 19, No. 3., pp. 193–212.
18. Hardisky M.A., Klemas V., Smart R.M., The influence of soil salinity, growth form, and leaf moisture on the spectral radiance of *Spartina alterniflora* canopies, *Photogrammetric Engineering and Remote Sensing*, 1983, Vol. 49, pp. 77–83.
19. Kogan F.N., Droughts of the late 1980s in the United States as derived from NOAA polar-orbiting satellite data, *Bulletin of the American Meteorological Society*, 1995, Vol. 76, No. 5, pp. 655–668.
20. Kuenzer C., Dech S., Wagner W., Remote Sensing Time Series: Revealing Land Surface Dynamics, *Remote Sensing and Digital Image Processing*, Springer, 2015, 441 p.
21. Lambert J., Drenou C., Denux J. P., Gérard B., Chéret V., Monitoring forest decline through remote sensing time series analysis, *GIScience and Remote Sensing*, 2013, Vol. 50, Issue 4, pp. 437–457.
22. Lu L., Kuenzer C., Wang C., Guo H., Li Q., Evaluation of Three MODIS-Derived Vegetation Index Time Series for Dryland Vegetation Dynamics Monitoring, *Remote Sens.*, 2015, Vol. 7, No. 6, pp. 7597–7614.
23. Nelder J.A., Mead R., A simplex method for function minimization, *Computer Journal*, 1965, Vol. 7, pp. 308–313.
24. Prabakaran C., Singh C.P., Panigrahy S., Parihar J.S., Retrieval of forest phenological parameters from remote sensing-based NDVI time-series data, *Current Science*, 2013, Vol. 105, No. 6, pp. 795–802.
25. Richardson A.J., Wiegand C.L., Distinguishing vegetation from soil background information, *Photogrammetric Engineering and Remote Sensing*, 1977, Vol. 43, pp. 1541–1552.
26. Wang H., Dai J., Ge Q., Comparison of Satellite and Ground-Based Phenology in China's Temperate Monsoon Area, *Advances in Meteorology*, 2014, 10 p.
27. White M.A., Thornton P.E., Running S.W. A continental phenology model for monitoring vegetation responses to inter-annual climatic variability, *Glob. Biogeochem. Cycles*, 1997, Vol. 11, No. 2, pp. 217–234.