

ЛЕСНОЕ ХОЗЯЙСТВО FORESTRY

УДК 630*181.351

DOI: 10.25686/2306-2827.2019.1.5

АЛГОРИТМ ОПРЕДЕЛЕНИЯ ФЕНОЛОГИЧЕСКИХ ХАРАКТЕРИСТИК ЛЕСНОГО ПОКРОВА НА ОСНОВЕ ВРЕМЕННЫХ РЯДОВ СПУТНИКОВЫХ ДАННЫХ

О. Н. Воробьев¹, Э. А. Курбанов¹, Е. Н. Демишева¹, С. А. Меньшиков², Л. Н. Смирнова¹

¹ Поволжский государственный технологический университет,
Российская Федерация, 424000, Йошкар-Ола, пл. Ленина, 3
E-mail: vorobievon@volgatech.net; kurbanovea@volgatech.net

² Пензенский филиал ФГБУ «Рослесинфорг»,
Российская Федерация, 440604, Пенза, ул. Захарова, д. 20 а
E-mail: plata_ms@mail.ru

Фенологические показатели лесного покрова являются ключевыми индикаторами для лучшего понимания текущего состояния лесов и их отклик на изменение климата. В работе предложен алгоритм обработки временных рядов вегетационного индекса NDVI за 2000–2018 гг., полученных по 16-дневным композитам спектрорадиометра MODIS на территорию Куярского лесничества Марийского лесного Заволжья, в программе TIMESAT. Серия данных NDVI MODIS была выравнена в этой программе с использованием метода (фильтра) Савицкого-Голея. Алгоритм позволил количественно оценить шесть фенологических показателей лесного покрова для участка (группы пикселей) исследуемого лесничества: начало сезона (SOS), конец сезона (EOS), продолжительность вегетационного периода (LOS), максимальное значение NDVI (MV), день года MV и амплитуда вегетационного сезона (SA). Результаты исследования показали, что за 18-летний период колебания в фенологических показателях не оказали существенного влияния на продуктивность и рост лесов на исследуемой площади.

Ключевые слова: лесной покров; ДЗЗ; временные ряды; TIMESAT; MODIS; NDVI; фенологические показатели; Марийское лесное Заволжье.

Введение. Фенологические показатели растительного покрова Земли являются важными индикаторами глобального изменения климата, свидетельствующими о соответствующих изменениях в устойчивости лесных экосистем [1]. Существуют многочисленные свидетельства и исследования о влиянии происходящих изменений климата на рост растительности [2–4], включая депонирование углерода [5, 6], и продуктивность лесов [7, 8]. Считается, что умеренные и бореальные лес-

ные экосистемы могут реагировать на температурные аномалии с более значительными биогеофизическими последствиями, чем леса тропической зоны [9]. В связи с суровыми климатическими условиями хвойно-широколиственные леса умеренного и бореального пояса Среднего Поволжья Российской Федерации особенно уязвимы к изменению климата, что может привести к стрессам от засух и частоте лесных пожаров в долгосрочной перспективе [10, 11].

© Воробьев О. Н., Курбанов Э. А., Демишева Е. Н., Меньшиков С. А., Смирнова Л. Н., 2019.

Для цитирования: Воробьев О. Н., Курбанов Э. А., Демишева Е. Н., Меньшиков С. А., Смирнова Л. Н. Алгоритм определения фенологических характеристик лесного покрова на основе временных рядов спутниковых данных // Вестник Поволжского государственного технологического университета. Сер.: Лес. Экология. Природопользование. 2019. № 1 (41). С. 5–20. DOI: 10.25686/2306-2827.2019.1.5

Более глубокое понимание взаимодействия между климатом и растительностью имеет ключевое значение для прогнозирования воздействия изменения климата на экосистемы. Тем не менее, связь между климатом и растительностью является сложной зависимостью, независимо от географического масштаба.

Фенологические показатели, полученные со спектрорадиометров спутниковых систем, могут быть использованы для оценки происходящих изменений климата и его влияния на лесной покров во времени и пространстве [12–14]. Такие показатели и получаемые на их основе значения вегетационных индексов (ВИ) представляют ценную информацию для специалистов о круговороте углерода, сезонной динамике различного рода лесного покрова, физиологических и гидрологических процессах, взаимодействии между лесным покровом и атмосферой, а также при работах по выявлению изменений в земле- и лесопользовании [15, 16]. Для этих целей обычно используют временные ряды данных спутниковых наблюдений среднего и высокого пространственного и временного разрешений.

Временной ряд представляет собой набор наблюдений (статистический материал) обычно одного исследуемого процесса, регистрируемых непрерывно или через некоторые моменты времени [17, 18]. Для каждого наблюдения такого ряда приводится время или номер его измерения по порядку. Временной ряд отличается от простой выборки данных тем, что при его анализе учитывается взаимосвязь измерений со временем, а не только статистические характеристики оцениваемых данных. Анализ временных рядов, позволяющий глубже оценить исследуемый процесс (феномен), основан на ряде методов анализа и моделировании последовательности наблюдений [19]. Метод временных рядов широко используется в дистанционном зондировании Земли при прогнозном моделировании на основе серии спутниковых данных, выявлении

смещения пространственного распределения биоклиматических зон, а также при оценке и анализе фенологических параметров, характеризующих динамику состояния растительности в течение определённого периода времени [20–23].

При решении подобных задач предполагается, что временные ряды состоят из систематических шаблонов данных (оцениваемых компонентов) и так называемого случайного шума, ошибки данных. Основные показатели временных рядов, выступающих в качестве стандартных шаблонов, описываются такими системными компонентами, как тренды и сезонность.

Изучение вышеназванных проблем особенно актуально для лесных насаждений Марийского Заволжья, которые за последние десятилетия были неоднократно подвергнуты сильным природным и антропогенным нарушениям [24, 25], приведшим к их усыханию, пожарам, ветровалам и буреломам. Остаются недостаточно изученными вопросы влияния происходящих изменений на устойчивость лесных экосистем, взаимосвязь сезонных изменений с ареалами их произрастания и степенью их повреждения, а также использования спутниковых данных при выполнении подобных исследований

Целью данной работы была разработка и апробация алгоритма по определению фенологических признаков и показателей биопродуктивности лесного покрова на основе анализа временных рядов спутниковых данных в динамическом окне программы TIMESAT на уровне участка одного лесничества. В исследовании мы использовали данные спектрорадиометра MODIS, полученные для лесного покрова Марийского Заволжья.

Объекты и данные исследований.

Объектами исследования явились лесные насаждения на территории Куярского лесничества в Марийском Заволжье, подвергшиеся пожарам в 2010 году (рис. 1). В результате пожаров 2010 года огнём были пройдены значительные пло-

щади древостоев лесничества, ранее представленные насаждениями сосны IV класса возраста и берёзы VII–IX классов возраста с полнотой 0,7–0,8. На гарях 2010 года наблюдаются процессы естественного зарастания лиственными породами, задернения нарушенных земель многолетними травами, также встречаются сухости и открытые участки.

Исследуемый район расположен в континентальной зоне умеренных широт с умеренно-континентальным климатом, характеризующимся продолжительной и холодной с незначительными оттепелями

зимой; поздней, прохладной весной; коротким, жарким летом; прохладной, дождливой и затяжной осенью [26]. Лето в южной части района жаркое: среднемесячная температура июля $+17...+20$ °С, зима довольно холодная: средняя температура января от -11° до -16 °С. Сравнительно реже, обычно с проходящими циклонами, в район поступает морской воздух, сформировавшийся над Атлантикой, вызывающий дождливую прохладную погоду летом; зимой в таких случаях наступает потепление, сопровождающееся иногда оттепелями.

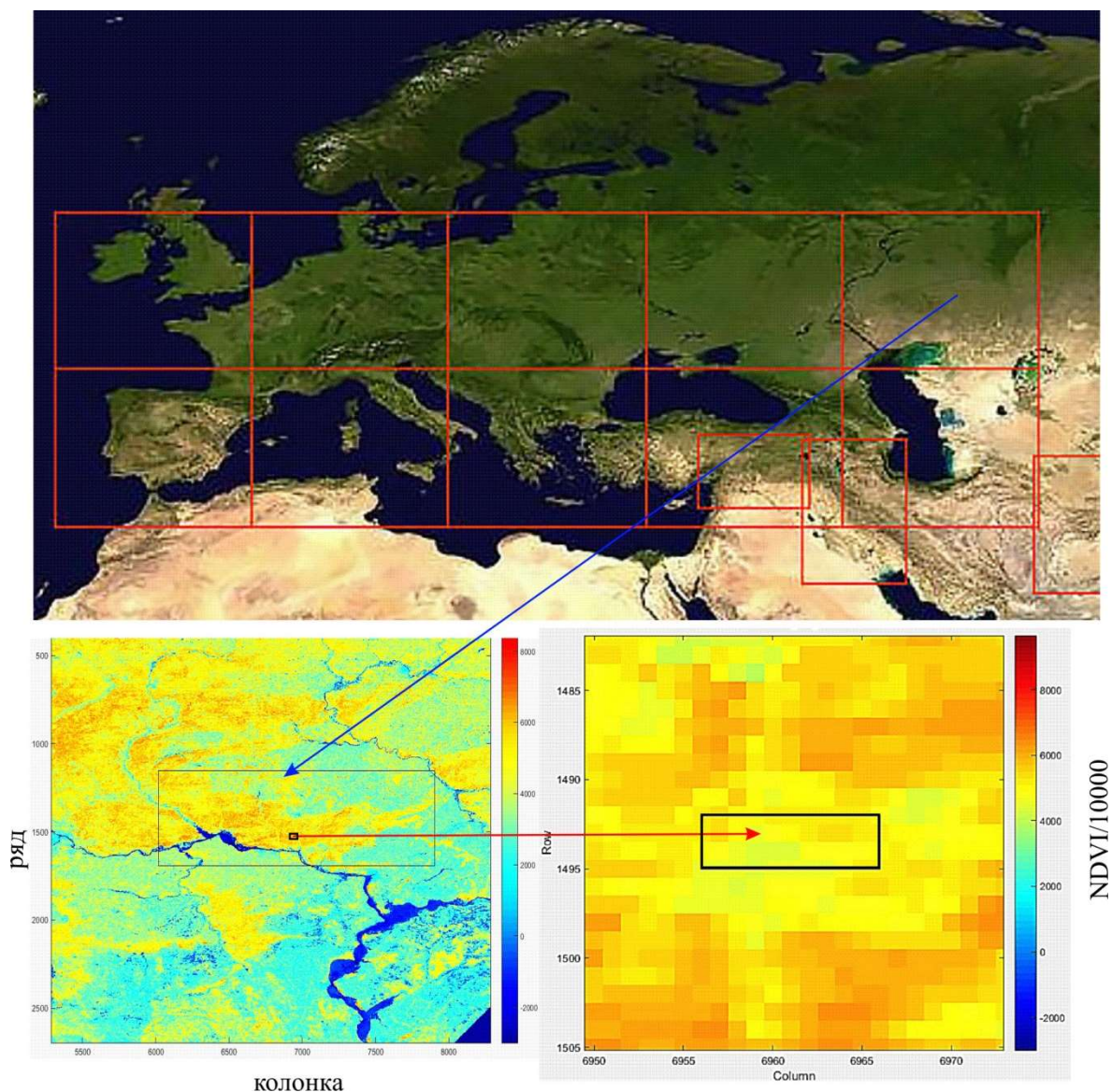


Рис. 1. Исследуемый участок Куярского лесничества Марийского лесного Заволжья (группа пикселей) на снимке NDVI MODIS

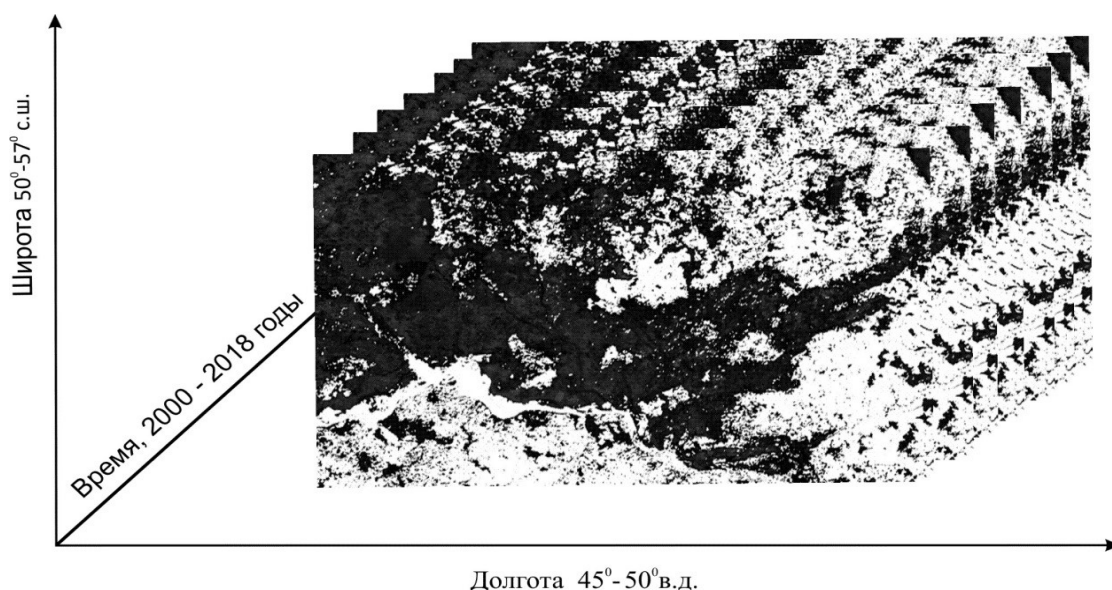


Рис. 2. Временной ряд изображений вегетационного индекса NDVI радиометра MODIS на территорию Марийского лесного Заволжья за период с 2000 по 2018 гг.

Для временных рядов ВИ NDVI использовались 16-дневные композиты MODIS (MOD13Q1) с пространственным разрешением 250 м в синусоидальной проекции, что позволяет избежать атмосферного влияния на качество изображения и фенологических изменений в растительном покрове (USGS-EROS, <http://LPDAAC.usgs.gov>). В исследовании использовался набор из 32 524 временных рядов показателей NDVI MODIS за 2000–2018 гг. (рис. 2), полученный на территорию исследования с 15 апреля по 15 ноября, что позволяет исключить влияние таких факторов, как снеговой покров и участки местности, не покрытые растительностью. Основная работа проводилась на участке ряд 1 492 колонка 6 965.

Методика исследований. Был разработан алгоритм анализа вегетационных индексов в специализированной программе TIMESAT-3.3, предназначенной для обработки временных рядов спутниковых снимков и определения фенологических показателей на основе этих данных [27]. TIMESAT широко используется для сглаживания «шумов» и восстановления данных для временных рядов спутниковых данных с помощью математических функций с последующим извлечением

значений ключевых фенологических индексов (метрики) показателей. Эта программа позволяет получать и анализировать фенологические характеристики по спутниковым данным: начало и конец вегетационного периода, минимальное и максимальное значения ВИ, время наступления его максимума и значение интеграла под кривой его динамики, углы наклона на восходящем и нисходящем её отрезках, сезонная амплитуда (табл. 1, рис. 3).

TIMESAT обладает удобными функциями для удаления пиков на кривых распределения исследуемых закономерностей, сглаживания данных тремя способами (фильтр Савицкого-Голея, асимметричная гауссова или двойная логистическая функции), а также использования информации о типах ландшафтов. Выходные данные программы представляют собой выравненные значения для каждого интервала времени и сезонные параметры для каждого идентифицированного вегетационного периода. Обработка данных выполняется в графическом интерфейсе пользователя, в котором можно проводить необходимые настройки на основе визуального контроля временных рядов выборки из набора спутниковых изображений.

Таблица 1

Характеристика сезонных параметров, используемых в программе TIMESAT

Показатели	Описание
Начало вегетационного периода (SOS – Time for the start of the season)	Время, на которое левый край на кривой увеличился до установленного пользователем уровня (обычно от определённой части сезонной амплитуды), полученное от левого минимального уровня
Конец вегетационного периода (EOS – time for the end of the season)	Время, на которое правый край на кривой уменьшился до уровня установленного пользователем, измеренное от правого минимального уровня
Продолжительность вегетационного периода (LOS – Length of season)	Время от начала до конца вегетационного сезона
Базовый уровень (BL – Base level)	Среднее значение от минимальных левого и правого значения
Середина вегетационного сезона (TMS – Time of mid-season)	Определяется как среднее значение времени, на которое левый край кривой увеличился до уровня 80 %, а правый край снизился до уровня 80 %
Максимальное значение данных для выбранной функции в течение сезона (MV – Maximum VI)	Может иметь место в разное время по сравнению с TMS
Амплитуда вегетационного периода (SA – Seasonal amplitude)	Разница между максимальным значением и базовым уровнем
Степень (скорость) роста в начале сезона (RI – rate of increase)	Рассчитывается как соотношение разницы между левыми 20 % и 80 % уровнями на кривой и соответствующей разницей во времени
Степень (скорость) снижения в конце сезона (RD – Rate of decrease)	Рассчитывается как абсолютное значение соотношения разницы между правыми 20 % и 80 % уровнями на кривой и соответствующей разностью во времени. Таким образом, скорость снижения даётся как положительная величина
Большой сезонный интеграл (LInt – large integral)	Интеграл от функции, описывающей сезон от его начала и до конца. Не имеет значения, когда выравненная функция имеет отрицательные величины
Малый сезонный интеграл (SInt – Small integral)	Интеграл от разности между функцией, описывающей сезон, и базовым уровнем от начала и до конца сезона

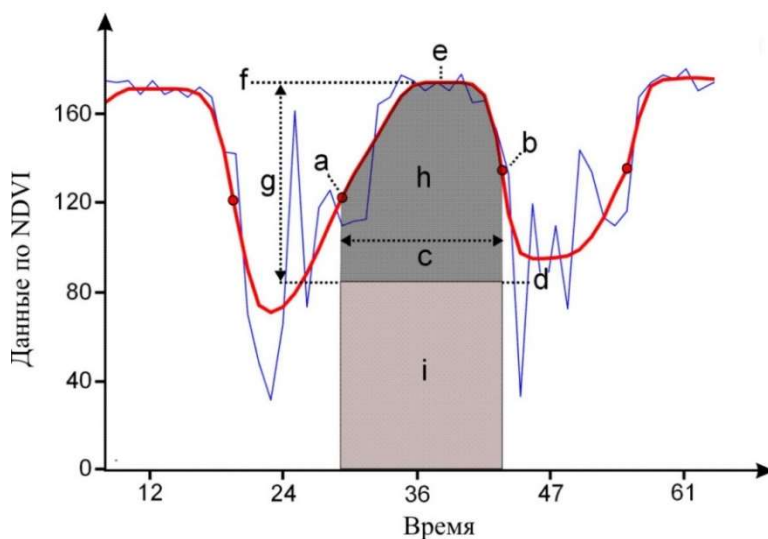


Рис. 3. Сезонные показатели, получаемые в программе TIMESAT: a – начало сезона (вегетационного периода), b – конец сезона (вегетационного периода), c – продолжительность вегетационного периода; e – время середины сезона, f – максимальное значение, g – амплитуда, h – малое интегрированное значение, (h+i) большое интегрированное значение (адаптировано [28])

Программа TIMESAT также может быть интегрирована в MATLAB, представляющий собой пакет прикладных программ, высокоуровневый язык и интерактивную среду для программирования численных расчётов и визуализацию результатов. Это позволяет анализировать данные, разрабатывать алгоритмы, создавать модели и приложения (рис. 4).

Для оценки временных рядов ВИ были использованы шесть из одиннадцати сезонных показателей программы TIMESAT-3.3, которые позволяют проанализировать пространственно-временную динамику растительного покрова в зависимости от изменения климата или землепользования (табл. 1). Три показателя характеризуют продуктивность насаждений в течение вегетационного периода: «Амплитуда вегетационного сезона», «Максимальное значение данных для выбранной функции в течение сезона» и «День максимального значения NDVI». Другие три показателя имеют отношение к фенологическим фазам развития растительного покрова: «Начало вегетационного периода», «Конец вегетационного периода»

и «Продолжительность вегетационного периода» [28].

Наиболее часто при исследовании временных рядов применяют пороговый метод, который позволяет определить начало вегетационного сезона (SOS) и его конец (EOS) на основе пороговых значений ВИ. При этом SOS определяется как день в году (DOY – Day of the year), когда ВИ пересекает заданный порог значений в восходящем тренде. Аналогично, EOS определяется как DOY, когда ВИ пересекает тот же порог в нисходящем направлении [29,30]. В программе TIMESAT начало вегетационного сезона по умолчанию определяется по нулевому значению NDVIratio (соотношение минимальных и максимальных значений NDVI в году [31]. Тем не менее, пользователь может задавать это значение самостоятельно. Исследования для региона северных широт, где наблюдается устойчивый снежный покров, показывают, что порог роста в 20 % был относительно приемлемым для определения начала и конца вегетационного периода [32]. В нашей работе мы тоже придерживаемся этого подхода при получении сезонных показателей.

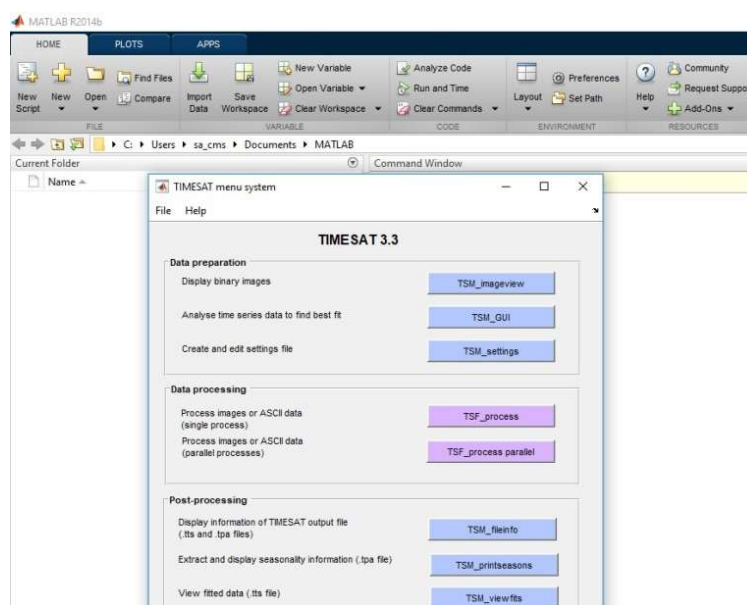


Рис. 4. Программный интерфейс TIMESET 3.3 в программе MatLab

Для анализа и визуализации пространственной изменчивости фенологических показателей, полученных по данным NDVI, были выбраны следующие показатели: начало и конец вегетационного периода, продолжительность (длина) сезона, амплитуда и максимальные значения NDVI, которые характеризуют фитомассу насаждений, для каждого пикселя группы исследуемого участка. Процедура группировки и анализа серии разновременных данных включала следующие этапы:

1) преобразование исходных данных набора данных MODIS из формата HDR (High dynamic range – высокий динамический диапазон) в BIN (Бинарный);

2) компиляция полученных бинарных данных в единый файл формата TXT – Timesat_2.txt;

3) визуализация пространственного распределения фенологических показателей ВИ с целью определения границ территории исследования;

4) обработка данных Timesat_2.txt в подмодуле GUI (Versatile graphical user

interface), представляющем собой универсальный графический интерфейс пользователя модуля TIMESAT;

5) визуализация пространственной изменчивости фенологических показателей ВИ с 2000 по 2018 гг.

Общий алгоритм для решения поставленных задач представлен на рис. 5.

Серия разновременных рядов NDVI по данным MOD13Q1 была обработана с использованием модуля TIMESAT TSF (Temporal Spatial Filter – временной пространственный фильтр) для извлечения изображений. Полученные данные прошли дополнительную обработку по сглаживанию временного ряда NDVI методом фильтрации от случайной его составляющей. Общая аппроксимация рядов NDVI выполнялась с использованием фильтра Савицкого-Голея [33] в пакете TIMESAT, который часто применяется для снижения (сглаживания) уровня шумов, представленных в виде влияния аэрозольных загрязнений, дымки или погрешностей аппаратуры [34].



Рис. 5. Алгоритм оценки временных рядов по данным MODIS

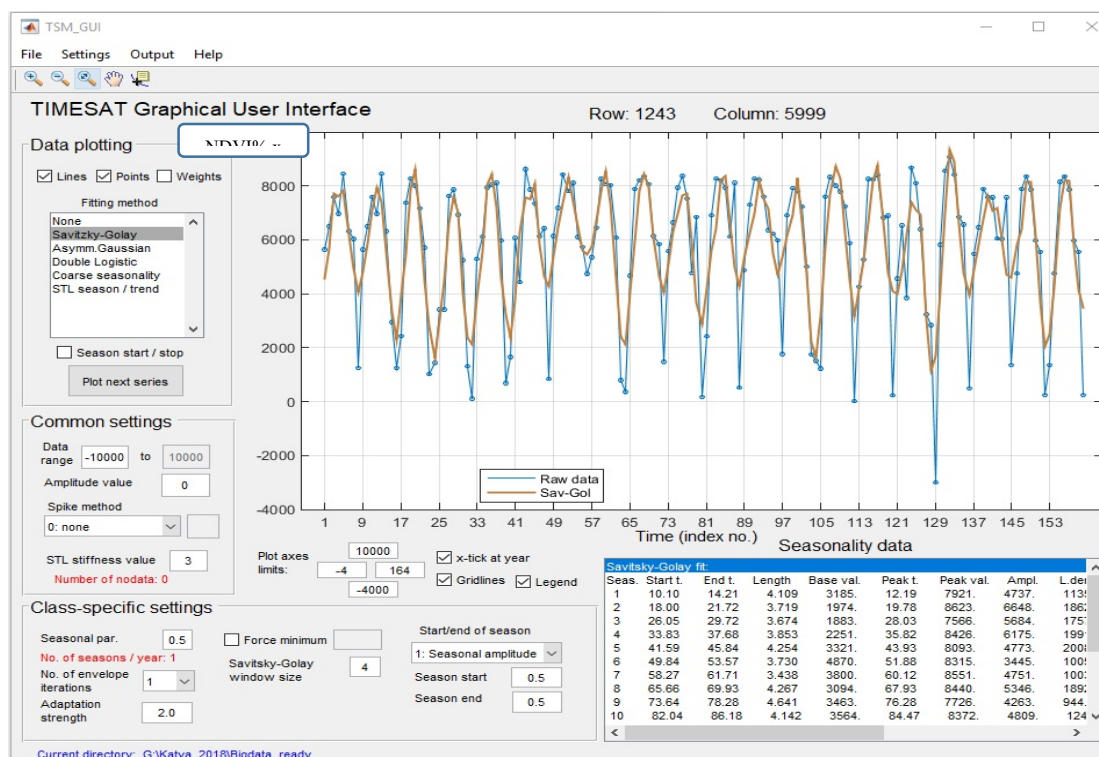


Рис. 6. Динамика ежегодных трендов максимумов NDVI за 2000–2018 гг. по данным группы пикселей изображения MODIS. Линия синего цвета представляет собой оригинальные данные NDVI. График линии коричневого цвета – выравненные значения с использованием функции Савицкого-Голея

Для этого применяется полиномиальное уравнение второго порядка с шириной скользящего окна, равного количеству композитов в году. Полином второй степени обеспечивает достаточно хорошую локальную аппроксимацию фенологической (сезонной) динамики значений спектрально-отражательных характеристик растительности [35]. Сезонные данные были получены по сглаженным кривым в программе TIMESAT, на основе которых сформирован файл в формате «тра». Далее вновь полученные данные обрабатывались и анализировались в модуле TIMESAT_TFSfit2img. Графическое представление извлечённых ключевых фенологических показателей, прошедших процедуру сглаживания с помощью математических функций значений временных рядов зашумлённых спутниковых данных, с помощью программы TIMESAT, представлено на рис. 6.

Итоговые сезонные данные за 18 исследуемых лет включали 11 фенологиче-

ских индексов, полученных после обработки и анализа каждого пикселя изображений NDVI на территорию исследования. Каждое индивидуальное изображение имело общее количество столбцов – 1 817 и количество строк, равное 462, и в итоге включало более 800 000 значений по каждому оцениваемому параметру (индексу).

Результаты и их обсуждение. Обработка и визуализация данных NDVI спектрорадиометра MODIS в пакете TIMESAT позволили получить средние фенологические показатели для участка лесного покрова на территории Куярского лесничества Республики Марий Эл. Для комплексного анализа в работе используется пространственное распределение всех древесных пород, включая хвойные, лиственные и смешанные древостои. Фенологический период каждого из 18 наблюдений рассматривался от середины апреля до середины ноября соответствующего года, что в сумме в среднем соста-

вило 210 дней. Выравненные данные NDVI, по которым были получены все фенологические показатели, приведены на рис. 7.

Полученные средние показатели по SOS и EOS показывают относительно устойчивую динамику за исследуемый период (рис. 8, а, табл. 2). Некоторое смещение дней начала вегетационного сезона наблюдалось в 2001, 2005, 2009, 2015 и 2016 гг., когда SOS достигал более 140 дней от начала календарного года. На эти же годы приходится максимум дней конца вегетации (EOS), превышая 250 дней от начала календарного года. Про-

должительность вегетационного сезона на исследуемом участке (LOS) в среднем колеблется от 96 до 154 дней (табл. 2). Максимальные периоды LOS приходились на 2001 (138 дней), 2010 (151 день), 2013 (121 день) и 2016 годы (154 дней) соответственно.

Анализ 18-летней динамики NDVI показывает существенное снижение фитомассы древостоя на исследуемом участке после 2010 года, что подтверждает точность выбранной площади, пройденной лесным пожаром (рис. 8, б). После этого года на исследуемом участке наблюдается устойчивая динамика накопления фитомассы.

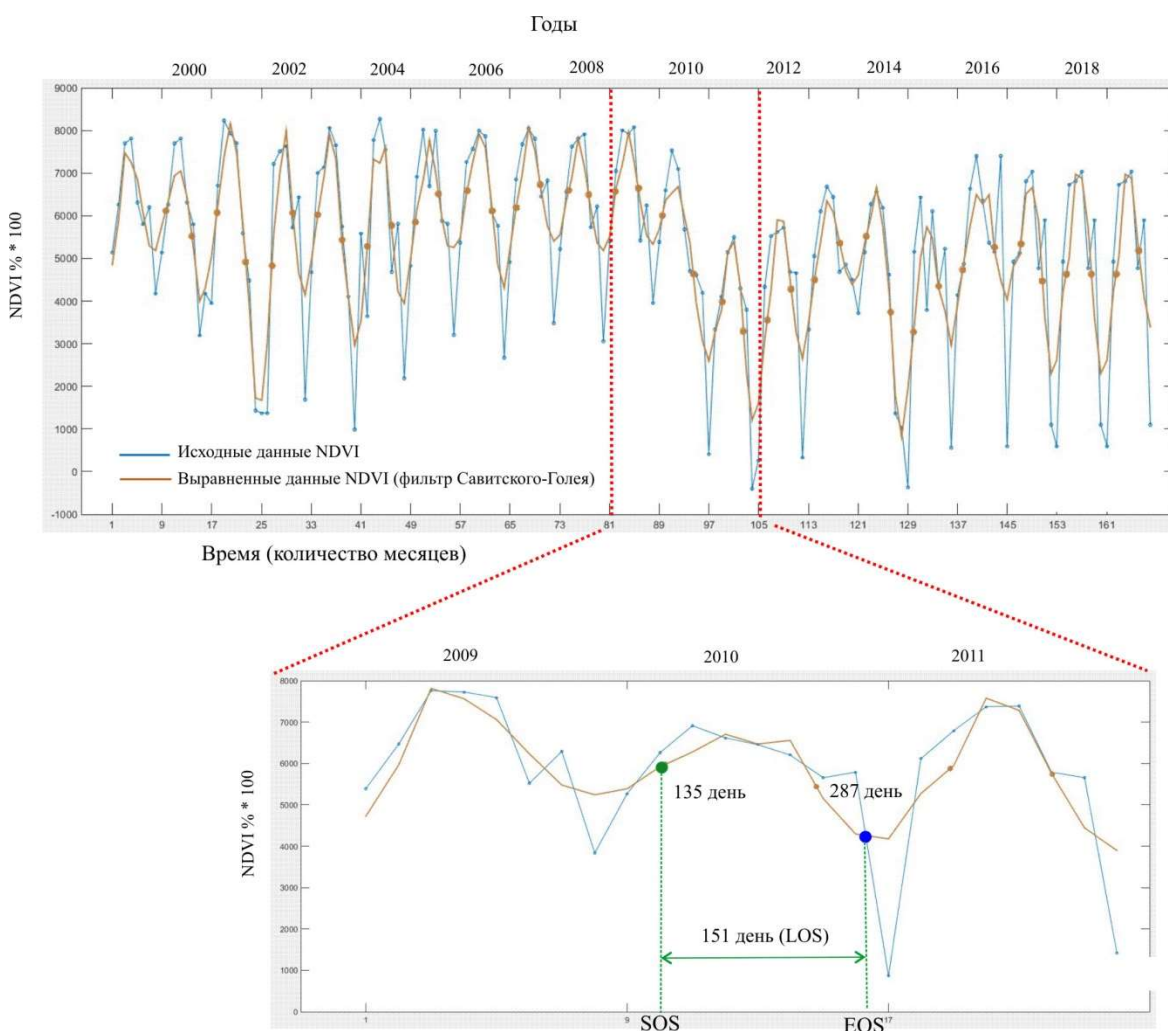


Рис. 7. Временной ряд NDVI лесного покрова Куярского лесничества за 2000–2018 гг. Первый и последний сегменты дублируются в программе TIMESAT для точности аппроксимации данных. SOS – день начала вегетационного сезона, EOS – день его окончания

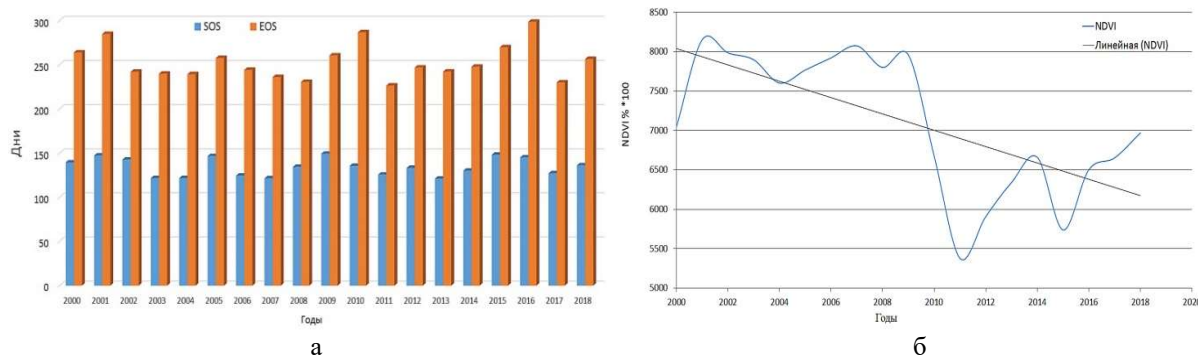


Рис. 8. Динамика: а – дней начала и конца вегетационного сезонов лесного покрова изучаемого пикселя, полученных в программном пакете TIMESAT, б – максимальные значения NDVI

Таблица 2

Данные по фенологическим показателям лесного покрова на исследуемый участок по данным MODIS NDVI

Годы	Начало сезона (SOS)	Продолжительность сезона (LOS)	Конец сезона (EOS)	Макс. значение (MV), NDVI % * 100	День, на который приходится MV	Амплитуда (SA)
2000	139	264	125	7051	204	2462
2001	147	285	138	8154	216	5316
2002	143	242	99	7986	199	5072
2003	122	240	118	7898	188	4338
2004	122	239	118	7603	182	4147
2005	147	258	111	7769	209	3168
2006	124	244	120	7923	189	3138
2007	121	236	115	8075	186	3220
2008	134	231	96	7801	185	2506
2009	149	261	111	7959	212	2694
2010	135	287	151	6674	202	2708
2011	126	226	101	5379	175	3477
2012	133	247	114	5907	193	3973
2013	121	242	121	6340	187	2820
2014	130	248	118	6661	187	4060
2015	148	270	122	5738	211	3844
2016	145	299	154	6502	232	3003
2017	127	230	103	6653	178	3491
2018	136	256	120	6970	199	4675

Выводы. Разработан и апробирован алгоритм в программе TIMESAT для определения фенологических характеристик лесного покрова и оценки его долгосрочной динамики на основе анализа временных рядов вегетационного индекса NDVI, полученных со спектрорадиометра MODIS. Необходимым условием применения предложенного алгоритма для описания сезонной динамики лесного покрова является наличие набора входных спутниковых данных по вегетационным индексам за рассматриваемый период времени.

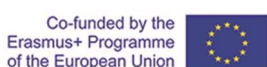
Эти результаты демонстрируют потенциал анализа временных рядов NDVI для мониторинга временной динамики растительных поверхностей, предоставляя дополнительную информацию для традиционных классификаций и схем обнаружения изменений.

Восемнадцатилетние временные ряды NDVI, полученные по данным спектрорадиометра MODIS, позволили определить тенденции в сезонных показателях, влияющих на динамику продуктивности лесов Куярского лесничества Марийского За-

волжья. Разработанный алгоритм и полученные данные являются важным материалом для оценки влияния происходящих климатических изменений на лесные экосистемы. Данные по сезонным показателям (SOS, EOS, LOS) также представляют собой ключевые индикаторы при исследовании биологической продуктивности лесов и смещении их ареалов произрастания.

Хотя использование NDVI для мониторинга фенологических явлений в смешанных хвойных и лиственных лесах

имеет некоторые ограничения, наше исследование показало, что этот ВИ может быть очень полезным инструментом при оценках последствий изменения окружающей среды на рост лесных экосистем. Авторы планируют доработать предложенный алгоритм с целью повышения точности выявления фенологических параметров с учётом типов леса, а также пространственно-временного распределения NDVI на большей территории и в связи с метеорологическими параметрами.



Работа была поддержана программой Erasmus + Jean Monnet Европейского союза (проект № 574894-EPP-1-2016-1-RU-EPPJMO-CoE). Данная публикация отражает точку зрения авторов, Европейская Комиссия не несет ответственности за содержание данной публикации и ее дальнейшее использование.

Список литературы

1. *Liang L., Schwartz M.D., Fei S.* Validating satellite phenology through intensive ground observation and landscape scaling in a mixed seasonal forest // *Remote Sensing of Environment*. 2011. Vol. 115. Pp. 143–157.
2. *Brown M.E., De Beurs K.M., Marshall M.* Global phenological response to climate change in crop areas using satellite remote sensing of vegetation, humidity and temperature over 26 Years // *Remote Sensing of Environment*. 2012. № 126. Pp. 174–183.
3. *Horion S., Cornet Y., Erpicum M., Tychon B.* Studying interactions between climate variability and vegetation dynamic using a phenology based approach // *International Journal of Applied Earth Observation and Geoinformation*. 2013. № 20. Pp. 20–32.
4. *Швецов Е.Г., Парфенова Е.И., Чебакова Н.М.* Мониторинг изменений растительности на территории Средней Сибири за период 1990-2015 гг. по данным Landsat // *Лесные экосистемы в условиях изменения климата: биологическая продуктивность и дистанционный мониторинг: сборник научных статей*. Йошкар-Ола: ПГТУ. 2018. № 4. С. 30-39.
5. К вопросу об углероддепонирующих насаждениях / Э.А. Курбанов, О.Н. Воробьев, Л.С. Мошкина и др. // *Вестник МарГТУ. Сер.: Лес. Экология. Природопользование*. 2008. № 3 (4). С. 5-17.
6. *Курбанов Э.А.* Углероддепонирующие насаждения Киотского протокола. Йошкар-Ола: МарГТУ, 2007. 184 с.
7. *Tchebakova N.M., Parfenova E.I., Soja A.J.* The effects of climate, permafrost and fire on vegetation change in Siberia in a changing climate // *Environmental Research Letters*. 2009. Vol. 4. Pp. 1-9.
8. *Пахучий В.В., Пахучая Л.М.* Оценка изменчивости площади участков островного местонахождения сосны кедровой сибирской в связи с их географическим положением в Республике Коми // *Лесные экосистемы в условиях изменения климата: биологическая продуктивность и дистанционный мониторинг: сборник научных статей*. Йошкар-Ола: ПГТУ, 2018. С. 82-92.
9. *Bonan G.B.* Forests and climate change: forcings, feedbacks, and the climate benefits of forests // *Science*. 2008. № 320. P. 1444–1449.
10. *IPCC, 2007.* The effects of climate change on agriculture, land resources, water resources and biodiversity. Washington, DC: Intergovernmental Panel on Climate Change. 2007. P. 243 p.
11. Recent shift in Eurasian boreal forest greening response may be associated with warmer and drier summers / W. Buermann, P.R. Bikkash, M. Jung et al. // *Geophysical research letters*. 2014. № 41. Pp. 1995–2002.
12. *Курбанов Э.А.* Два десятилетия исследований растительного покрова по MODIS / *Лесные экосистемы в условиях изменения климата: биологическая продуктивность и дистанционный мониторинг: сборник научных статей*. Йошкар-Ола: ПГТУ, 2016. С. 123-132.
13. Detecting the effects of climate change on canopy phenology in coniferous forests in Semi-Arid mountain regions of China / *J. Du, Z. He, J. Yang, et al.* // *International Journal of Remote Sensing*. 2014. № 35. Pp. 6490–6507.
14. Relationships between MODIS phenological metrics, topographic shade, and anomalous temperature patterns in seasonal deciduous forests of south Brazil / *S.T. Thiago, L.S. Galvão, F.M. Breunig et al.* // *International Journal of Remote Sensing*. 2015. Vol. 36. № 18. Pp. 4501–4518.
15. О связи фенологического развития растительности таежной зоны с величиной NDVI, определенной по спутниковым данным / *М.А. Медведева, В.В. Елсаков, И.Ю. Савин и др.* // *Современные проблемы дистанционного зондирования Земли из космоса*. 2010. Т. 7. № 1. С. 319–329.

16. *Leinenkugel P., Kuenzer C., Oppelt N., Dech S.* Characterisation of land surface phenology and land cover based on moderate resolution satellite data in cloud prone areas: a novel product for the Mekong basin // *Remote Sensing of Environment*. 2013. № 136. Pp. 180–198.
17. *Мишулина О.А.* Статистический анализ и обработка временных рядов. М.: МИФИ, 2004. 180 с.
18. *Madsen H.* Time series analysis. – 1st Edition Chapman and Hall/CRC. 2007. 392 p.
19. *Chandler R.E., Scott E.M.* Exploratory analysis: statistical methods for trend detection and analysis in the environmental sciences. Chichester, UK: John Wiley & Sons, Ltd, 2011. P. 25-59.
20. Спутниковое картографирование растительного покрова России / С.А. Барталев, В.А. Егоров, В.О. Жарко и др. // М.: ИКИ РАН. 2016. 208 с.
21. Improved forest-cover mapping based on MODIS time series and landscape stratification / E. Cano, J.F. Denux, M. Bisquert et al. // *International Journal of Remote Sensing*. 2017. № 38(7). Pp. 1865-1888.
22. A method for mapping Australian woody vegetation cover by linking continental-scale field data and long-term Landsat time series / T. Gill, K. Johansen, S. Phinn et al. // *International Journal of Remote Sensing*. 2017. № 38(3). Pp. 679-705.
23. Analyzing spatial and temporal variability in short-term rates of post-fire vegetation return from Landsat time series / R.J. Frazier, N.C. Coops, M.A. Wulder et al. // *Remote Sensing of Environment*. 2018. № 205. Pp. 32–45.
24. Оценка точности и сопоставимости тематических карт лесного покрова разного пространственного разрешения на примере Среднего Поволжья / Э.А. Курбанов, О.Н. Воробьев, А.В. Губаев и др. // *Современные проблемы дистанционного зондирования Земли из космоса*. 2016. Т. 13. № 1. С. 36-48.
25. Оценка динамики и нарушенности лесного покрова в Среднем Поволжье по снимкам Landsat / О.Н. Воробьев, Э.А. Курбанов, Ю.А. Полевщикова и др. // *Современные проблемы дистанционного зондирования Земли из космоса*. 2016. Том. 13. № 4. С. 124-134.
26. *Френкель М.О.* Межрегиональный экомониторинг Волжского бассейна. Киров: АО «Кирово-Чепецкий химкомбинат», 1997. 178 с.
27. *Jönsson P., Eklundh L.* TIMESAT – a program for analyzing time-series of satellite sensor data // *Computers and Geosciences*. 2004. Vol. 30. Pp. 833- 845.
28. *Eklundh L., Jönsson P.* Timesat 3.1 Software Manual. Lund University, 2011. Sweden http://www.nateko.lu.se/personal/Lars.Eklundh/TIME_SAT/timesat.html
29. *de Beurs K.M., Henebry G.M.* Spatio-temporal statistical methods for modelling land surface phenology // Chapter 9. In (I.L. Hudson, M.R. Keatley, eds) *Phenological Research. Methods for environmental and climate change analysis*. Springer: New York, 2010. P. 117-208.
30. *Kuenzer C., Dech S., Wagner W.* Remote sensing time series: Revealing land surface dynamics. Springer, 2015. 441 p.
31. *Муклашев Т.С., Барталев С.А.* Метод определения фенологических характеристик растительного покрова на основе временных рядов спутниковых данных // *Современные проблемы дистанционного зондирования Земли из космоса*. 2016. Т. 13. № 1. С. 9–24.
32. Assessing phenological change and climatic control of Alpine grasslands in the Tibetan Plateau with MODIS time series / C. Wang, H. Guo, L. Zhang et al. // *International Journal of Biometeorology*. 2015. № 59. P. 11–23.
33. *Savitzky A., Golay M.J.E.* Smoothing and differentiation of data by simplified least squares procedures // *Analytical Chemistry*. 1964. № 36. P. 1627–1639.
34. Фильтрация методом Савицкого-Голея спектральных характеристик чувствительности матричных фотоприемных устройств / А.В. Никонов, Р.В. Давлетшин, Н.И. Яковлева и др. // *Успехи прикладной физики*. 2016. Т. 4. № 2. С. 198 – 205.
35. Алгоритм оценки долговременных вариаций MODIS NDVI / Б.В. Содномов, А.А. Аюджанов, Б.З. Цыдыпов и др. // *Журнал Сибирского федерального университета*. 2018. Т. 11. № 1. С. 61-68.

Статья поступила в редакцию 26.02.19.

Принята к публикации 12.03.19.

Информация об авторах

ВОРОБЬЕВ Олег Николаевич – кандидат сельскохозяйственных наук, доцент кафедры лесоводства и лесоустройства, Поволжский государственный технологический университет. Область научных интересов – дистанционное зондирование лесов и ГИС, депонирование углерода лесными экосистемами, мониторинг лесных экосистем. Автор 70 научных и учебно-методических работ.

КУРБАНОВ Эльдар Аликрамович – доктор сельскохозяйственных наук, профессор кафедры лесоводства и лесоустройства, руководитель международного центра совершенства им. Жана Моне, Поволжский государственный технологический университет. Область научных интересов – устойчивое управление лесами, дистанционное зондирование земли и ГИС, биологическая продуктивность лесных экосистем, депонирование углерода лесными экосистемами, леса Киото. Автор 150 научных и учебно-методических работ.

ДЕМИШЕВА Екатерина Николаевна – младший научный сотрудник кафедры лесоводства и лесоустройства, Поволжский государственный технологический университет. Область научных интересов – дистанционное зондирование лесов и ГИС, оценка загрязнённых территорий. Автор пяти публикаций.

МЕНЬШИКОВ Сергей Андреевич – начальник отдела государственной инвентаризации лесов, Пензенский филиал ФГБУ «Рослесинфорг». Область научных интересов – дистанционное зондирование земли и ГИС, биологическая продуктивность лесных экосистем. Автор пяти публикаций.

СМИРНОВА Любовь Николаевна – аспирант кафедры лесоводства и лесоустройства, Поволжский государственный технологический университет. Область научных интересов – дистанционное зондирование земли и ГИС, биологическая продуктивность лесных экосистем. Автор пяти публикаций.

UDC 630*181.351

DOI: 10.25686/2306-2827.2019.1.5

ALGORITHM FOR REVILING THE PHENOLOGICAL PARAMETERS OF FOREST COVER ON THE BASE OF TIME SERIES OF SATELLITE DATA

O. N. Vorobev¹, E. A. Kurbanov¹, E. N. Demisheva¹, S. A. Menshikov², L. N. Smirnova¹

¹Volga State University of Technology,

3, Sq. Lenina, Yoshkar-Ola, 424000, Russian Federation

E-mail: vorobievon@volgatech.net; kurbanovea@volgatech.net

²Penza branch of the federal state budgetary organization «Roslesinforг»,

20 a, Zakharova St, Penza, 440604, Russian Federation

E-mail: plata_ms@mail.ru

Keywords: forest cover; remote sensing; time series; TIMESAT; MODIS; NDVI; phenology parameters; Mari forest Zavolzhje

ABSTRACT

Phenological parameters of forest cover are key indicators for understanding the current state of forests and their response to climate change. The aim of the work was the development and testing of an algorithm for reviling phenological characteristics and indicators of forest bio-productivity based on the analysis of time series of satellite data in the TIMESAT dynamic window at the level of a single forest district. In the study, we used the MODIS data obtained for the forest cover of the Mari Zavolzhje region. The paper proposes an algorithm for processing the NDVI time series for 2000–2018, obtained by MODIS 16-day composites of on the territory of the Kuyar. Таким образом, подрост лиственницы американской часто встречается в открытых болотистых местах were aligned in this program using the Savitsky-Golay filter. The time series differs from simple data sampling by taking into account the correlation of measurements with time, and not just the statistical characteristics of the estimated data. Seasonal data were obtained from the smoothed curves in the TIMESAT program, on the basis of which a file in the "tpa" format was formed. The seasonal period of each of the 18 years of observations was considered from mid-April to mid-November of the respective year, which averaged 210 days in total. The algorithm made it possible to quantify 6 out of 1 phenological indicators of forest cover for a plot (group of pixels) of the studied forest areas: the start of the season (SOS), the end of the season (EOS), the length of the season (LOS), the maximum NDVI (MV), the day of the year of MV and vegetation season amplitude (SA). SOS and EOS averages obtained show relatively stable dynamics over the study period. Some shift in the days of the start of the season was observed in 2001, 2005, 2009, 2015 and 2016, when SOS reached more than 140 days from the beginning of the calendar year. For the same years, the maximum days of the end of the season (EOS) are accounted for exceeding 250 days from the beginning of the calendar year. The length of the season on the investigated forest district (LOS) varies on average from 96 to 154 days. The maximum LOS periods were for 2001 (138 days), 2010 (151 days), 2013 (121 days), and 2016 (154 days) respectively. The results of the study showed that over the 18-years period variations in phenological indicators did not have a significant impact on the productivity and growth of forests in the study area. Although the use of NDVI to monitor phenological characteristics in mixed coniferous and deciduous forests has some limitations, our research has shown that it can be a very useful tool in assessing the effects of environmental change on the growth of forest ecosystems.

Co-funded by the
Erasmus+ Programme
of the European Union



This research was supported by the Erasmus+ Jean Monnet program of the European Union (Project № 574894-EPP-1-2016-1-RU-EPPJMO-CoE). The European Commission support for the production of this publication does not constitute an endorsement of the contents, which reflects the views only of the authors, and the Commission cannot be held responsible for any use, which may be made of the information contained therein.

REFERENCES

1. Liang L., M.D. Schwartz, S. Fei. Validating satellite phenology through intensive ground observation and landscape scaling in a mixed seasonal forest. *Remote Sensing of Environment*. 2011. Vol. 115. Pp. 143–157.
2. Brown M.E., De Beurs K.M., Marshall M. Global phenological response to climate change in crop areas using satellite remote sensing of vegetation, humidity and temperature over 26 Years. *Remote Sensing of Environment*. 2012. No 126. Pp. 174–183.
3. Horion S. Cornet Y., Ericum M. et al. Studying interactions between climate variability and vegetation dynamic using a phenology based approach. *International Journal of Applied Earth Observation and Geoinformation*. 2013. No 20. Pp. 20–32.
4. Shvetsov E.G., Parfenova E.I., Chebakova N.M. Monitoring izmeneniy rastitel'nosti na territorii Sredney Sibiri za period 1990-2015 gg. po dannym Landsat [Monitoring of vegetation changes in the Central Siberia between 1990 and 2015 using Landsat data]. *Lesnye Ekosistemy v Usloviyakh Izmeneniya Klimata: Biologicheskaya Produktivnost' i Distantionnyy Monitoring: Sbornik Nauchnykh Statey* [Forest Ecosystems under Climate Change: Biological Productivity and Remote Monitoring (International Compendium of research paper)]. Yoshkar-Ola: VSUT. 2018. No 4. Pp. 30-39. (In Russ.).
5. Kurbanov E.A., Vorob'ev O.N., Moshkina L.S. et al. K voprosu ob uglerododeponiruyushchikh nasazhdeniyakh [To the question of forest sequestration plantations]. *Vestnik MarGTU. Ser.: Les. Ekologiya. Prirodopol'zovanie* [Vestnik of Mari State Technical University. Ser.: Forest. Ecology. Nature Management]. 2008. No 3 (4). Pp. 5-17. (In Russ.).
6. Kurbanov E.A. Uglerododeponiruyushchie nasazhdeniya Kiotskogo protokola (Carbon sequestration forest plantations of Kyoto protocol). Yoshkar-Ola: MarGTU. 2007. 184 p. (In Russ.).
7. Tchepakova N.M., Parfenova E.I., Soja A.J. The effects of climate, permafrost and fire on vegetation change in Siberia in a changing climate. *Environmental Research Letters*. 2009. Vol. 4. Pp. 1-9.
8. Pakhuchiy V.V., Pakhuchaya L.M. Otsenka izmenchivosti ploshchadi uchastkov ostrovnogo mes-tonakhozheniya sosny kedrovoy sibirskoy v svyazi s ikh geograficheskim polozheniem v Respublike Komi [Assessment of area variability island plots of Siberian stone pine in connection with their geographical location in the Komi Republic]. *Lesnye ekosistemy v usloviyakh izmeneniya klimata: biologicheskaya produktivnost' i distantionnyy monitoring: sbornik nauchnykh statey* [Forest Ecosystems under Climate Change: Biological Productivity and Remote Monitoring (International Compendium of research paper)]. Yoshkar-Ola: VSUT. 2018. Pp. 82-92. (In Russ.).
9. Bonan G.B. Forests and climate change: forcings, feedbacks, and the climate benefits of forests. *Science*. 2008. No 320. Pp. 1444–1449.
10. IPCC, 2007. The effects of climate change on agriculture, land resources, water resources and biodiversity. Washington, DC: Intergovernmental Panel on Climate Change. 2007. P. 243 p.
11. Buermann W., Bikash P.R., Jung M. et al. Recent shift in Eurasian boreal forest greening response may be associated with warmer and drier summers. *Geophysical Research Letters*. 2014. No 41. Pp. 1995–2002.
12. Kurbanov E.A. Dva desyatiletiya issledovaniy rastitel'nogo pokrova po MODIS [Two decades of MODIS forest cover research]. *Lesnye ekosistemy v usloviyakh izmeneniya klimata: biologicheskaya produktivnost' i distantionnyy monitoring: sbornik nauchnykh statey* [Forest Ecosystems under Climate Change: Biological Productivity and Remote Monitoring (International Compendium of research paper)]. Yoshkar-Ola: VSUT. 2016. Pp. 123-132. (In Russ.).
13. Du J., He Z., Yang J. et al. Detecting the effects of climate change on canopy phenology in coniferous forests in Semi-Arid mountain regions of China. *International Journal of Remote Sensing*. 2014. No 35. Pp. 6490–6507.
14. Thiago S.T. Galvão L.S., Breunig F.M. et al. Relationships between MODIS phenological metrics, topographic shade, and anomalous temperature patterns in seasonal deciduous forests of south Brazil. *International Journal of Remote Sensing*. 2015. Vol. 36. No 18. Pp. 4501-4518.
15. Medvedeva M.A., Elsakov V.V., Savin I.Yu. et al. O svyazi fenologicheskogo razvitiya rastitel'nosti taezhnoy zony s velichinoy NDVI, opredelennoy po sputnikovym dannym [About the correlation between vegetation phenological dynamics of northern taiga and satellite based NDVI values]. *Sovremennyye problemy distantionnogo zondirovaniya Zemli iz kosmosa* [Current Problems in Remote Sensing of the Earth from Space]. 2010. Vol. 7. No 1. Pp. 319–329. (In Russ.).
16. Leinenkugel P., Kuenzer C., Oppelt N. et al. Characterisation of land surface phenology and land cover based on moderate resolution satellite data in

cloud prone areas: a novel product for the Mekong basin. *Remote Sensing of Environment*. 2013. No 136. P. 180–198.

17. Mishulina O.A. *Statisticheskii analiz i obrabotka vremennykh ryadov* [Statistical analyses of time series]. Moscow.: MIFI, 2004. 180 p. (In Russ.).

18. Madsen H. *Time series analysis*. 1st Edition Chapman and Hall/CRC. 2007. 392 p.

19. Chandler R.E., Scott E.M. *Exploratory analysis: statistical methods for trend detection and analysis in the environmental sciences*. Chichester, UK: John Wiley & Sons, Ltd, 2011. P. 25-59.

20. Bartalev S.A., Egorov V.A., Zharko V.O. et al. *Sputnikovoe kartografirovanie rastitel'nogo pokrova Rossii* [Satellite mapping of Russian vegetation cover]. Moscow: IKI RAN, 2016. 208 p. (In Russ.).

21. Cano E., Denux J.F., Bisquert M. et al. Improved forest-cover mapping based on MODIS time series and landscape stratification. *International Journal of Remote Sensing*. 2017. No 38(7). Pp. 1865-1888.

22. Gill T., Johansen K., Phinn S. et al. A method for mapping Australian woody vegetation cover by linking continental-scale field data and long-term Landsat time series. *International Journal of Remote Sensing*. 2017. No 38(3). Pp. 679-705.

23. Frazier R.J., Coops N.C., Wulder M.A. et al. Analyzing spatial and temporal variability in short-term rates of post-fire vegetation return from Landsat time series. *Remote Sensing of Environment*. 2018. No 205. Pp. 32–45.

24. Kurbanov E.A., Vorob'ev O.N., Gubaev A.V. et al. *Otsenka tochnosti i sopostavimosti tematicheskikh kart lesnogo pokrova raznogo prostranstvennogo razresheniya na primere Srednego Povolzh'ya* [Assessment of accuracy and comparability of forest cover thematic maps of different spatial resolution by example of Middle Povolzhje]. *Sovremennye problemy distantsionnogo zondirovaniya Zemli iz kosmosa* [Current Problems in Remote Sensing of the Earth from Space]. 2016. Vol. 13. No 1. Pp. 36-48. (In Russ.).

25. Vorob'ev O.N., Kurbanov E.A., Polevshchikova Yu.A. et al. *Otsenka dinamiki i narushennosti lesnogo pokrova v Srednem Povolzh'e po snimkam Landsat* [Assessment of dynamics and disturbance of forest cover in the Middle Povolzhje by Landsat images]. *Sovremennye problemy distantsionnogo zondirovaniya Zemli iz kosmosa* [Current Problems in Remote Sensing of the Earth from Space]. 2016. Vol. 13. No 4. Pp. 124-134. (In Russ.).

26. Frenkel' M.O. *Mezhregional'nyy ekomonitoring Volzhskogo basseyna* [Interregional eco monitoring of Volga basin]. Kirov, 1997. 178 p. (In Russ.).

27. Jönsson P., Eklundh L. *TIMESAT – a program for analyzing time-series of satellite sensor data*. *Computers and Geosciences*. 2004. Vol. 30. Pp. 833- 845.

28. Eklundh L., Jönsson P. *Timesat 3.1 Software Manual*. Lund University, 2011. Sweden <http://www.nateko.lu.se/personal/Lars.Eklundh/TIMESAT/timesat.html>

29. de Beurs K.M., Henebry G.M. *Spatio-temporal statistical methods for modelling land surface phenology*. Chapter 9. In (I.L. Hudson, M.R. Keatley, eds) *Phenological Research. Methods for environmental and climate change analysis*. Springer: New York, 2010. Pp. 117-208.

30. Kuenzer C., Dech S., Wagner W. *Remote sensing time series: Revealing land surface dynamics*. Springer, 2015. 441 p.

31. Miklashevich T.S., Bartalev S.A. *Metod opredeleniya fenologicheskikh kharakteristik rastitel'nogo pokrova na osnove vremennykh ryadov sputnikovyykh dannyykh* [Method for estimating vegetation cover phenological characteristics from satellite data time series]. *Sovremennye problemy distantsionnogo zondirovaniya Zemli iz kosmosa*. [Current Problems in Remote Sensing of the Earth from Space]. 2016. Vol. 13. No 1. Pp. 9–24. (In Russ.).

32. Wang C., Guo H., Zhang L. et al. *Assessing phenological change and climatic control of Alpine grasslands in the Tibetan Plateau with MODIS time series*. *International Journal of Biometeorology*. 2015. No 59. Pp. 11–23.

33. Savitzky A., Golay M.J.E. *Smoothing and differentiation of data by simplified least squares procedures*. *Analytical Chemistry*. 1964. No 36. Pp. 1627–1639.

34. Nikonov A.V., Davletshin R.V., Yakovleva N.I. et al. *Fil'tratsiya metodom Savitskogo-Goleya spektral'nykh kharakteristik chuvstvitel'nosti matrichnykh fotopriemnykh ustroystv* [Savitsky-Golay filtering method of spectral characteristics of the sensitivity of the matrix photodetector devices]. *Uspekhi prikladnoy fiziki* [Advances in Applied Physics]. 2016. Vol. 4. No 2. Pp. 198 – 205. (In Russ.).

35. Sodnomov B.V., Ayurzhanov A.A., Tsydy-pov B.Z. et al. *Algoritm otsenki dolgovremennykh variatsiy MODIS NDVI* [Algorithm for estimating long-term variations of MODIS NDVI]. *Zhurnal sibirskogo federal'nogo universiteta* [Journal of Siberian Federal University]. 2018. Vol. 11. No 1. Pp. 61-68. (In Russ.).

The article was received 26.02.19.
Accepted for publication 12.03.19.

For citation: Vorobev O. N., Kurbanov E. A., Demisheva E. N., Menshikov S. A., Smirnova L. N. Algorithm for Revising the Phenological Parameters of Forest Cover on the Base of Time Series of Satellite Data. *Vestnik of Volga State University of Technology*. Ser.: Forest. Ecology. Nature Management. 2019. No 1 (41). Pp. 5–20. DOI: 10.25686/2306-2827.2019.1.5

Information about authors

Oleg N. Vorobev – Candidate of Agricultural Sciences, Associate Professor at the Chair of Sylviculture and Forest Inventory, Volga State University of Technology. Research interests – forest remote sensing and GIS, carbon sequestration by the forest ecosystems, forest eco-systems monitoring, time series analyses. The author of more than 70 scientific publications and textbooks.

Eldar A. Kurbanov – Doctor of Agricultural Sciences, Professor at the Chair of Sylviculture and Forest Inventory, Head of the Jean Monnet Centre of Excellence, Volga State University of Technology. Research interests – sustainable forest management, remote sensing and GIS, biological productivity of forest ecosystems, carbon sequestration by the forest ecosystems, Kyoto forests. The author of 150 scientific publications and textbooks.

Ekaterina N. Demisheva – PhD Student at the Chair of Sylviculture and Forest Inventory, Volga State University of Technology. Research interest – forest remote sensing, assessment of contaminated and polluted lands, time series analyses. The author of 5 publications.

Sergey A. Menshikov – Head of the state forest inventory department of the Penza branch of the federal state budgetary organization «Roslesinfor». Research interest – forest remote sensing and GIS, biological productivity of forest ecosystems. The author of 5 publications.

Lyubov N. Smirnova – PhD student at the Chair of Sylviculture and Forest Inventory of Volga State University of Technology. Research interest – forest remote sensing and GIS, urban forests, time series analyses. The author of 5 publications.