

ИЗУЧЕНИЕ ФЕНОЛОГИЧЕСКОЙ ИЗМЕНЧИВОСТИ НАЗЕМНЫХ ЭКОСИСТЕМ ЮГА КРАСНОЯРСКОГО КРАЯ И ХАКАСИИ НА ОСНОВЕ СПУТНИКОВЫХ ДАННЫХ

© 2017 г. И.Ю. Ботвич, А.П. Шевырногов

Институт биофизики СО РАН, 660036, Красноярск, Академгородок, 50/50

E-mail: irina.pugacheva@mail.ru

Поступила в редакцию 10.05.16 г.

После доработки 21.10.16 г.

Проведено изучение особенностей фазовых портретов растительности (агрофитоценозы, древесная растительность), построенных в двумерном пространстве значений радиационной температуры и показателя Normalized Difference Vegetation Index. На их основе проведен анализ фенологической изменчивости растительности юга Красноярского края и республики Хакасии в течение периодов вегетации 2003 и 2006 гг. Выявлены отличительные особенности фазовых портретов агрофитоценозов и древесной растительности. Показана возможность определения границ фенологических состояний фитоценоза, области перехода из одного состояния в другое. Разработан алгоритм расчета времени начала и окончания вегетационного периода на основе комплексного анализа отражательных и излучательных характеристик растительных объектов.

Ключевые слова: спутниковые данные, фенология, сельскохозяйственные культуры, древесная растительность.

Материалы фенологических наблюдений являются наиболее показательными данными, отражающими реакцию биоты на изменение климата. Даты наступления фенологических фаз часто используются в качестве индикаторов глобального потепления, так как обладают коротким временем отклика и высокой чувствительностью к климатическим вариациям [1,2]. Данные о границах периода вегетации также необходимы для моделирования роста и развития растительного покрова, определения урожайности сельскохозяйственных культур, для планирования сельскохозяйственной и лесохозяйственной деятельности.

Появление спутниковой информации предоставило возможность дистанционного определения времени наступления и окончания периода вегетации, как в региональном, так и в глобальном масштабах. Существующие в настоящее время методы – логистические [3,4] и пороговые [5,6] – имеют ряд недостатков, ограничивающих их применение. Так, величина порога в «пороговом методе» определяется опытным путем с привлечением полевых геоботанических данных. Параметры логистических уравнений определяются статистическим способом, но точность логистического метода

снижается за счет большого числа определяемых статистически параметров (более двух) [6].

Настоящая работа посвящена изложению результатов изучения изменчивости фазовых портретов растительности, построенных в двумерном пространстве значений радиационной температуры (T) и Normalized Difference Vegetation Index ($NDVI$). Новые возможности дистанционного мониторинга фенологической изменчивости растительности осуществляются на основе комплексного анализа отражательных ($NDVI$) и излучательных (T) характеристик растительных объектов. Результаты исследования являются теоретической основой для разработки методики автоматического определения границ вегетационного периода без привлечения полевых геоботанических данных.

МЕТОДИКА И ОБЪЕКТЫ ИССЛЕДОВАНИЯ

Объектами исследований являются древесная растительность (береза повислая (*Betula pendula*), лиственница сибирская (*Larix sibirica*), осина обыкновенная (*Populus tremula*)) и посевы сельскохозяйственных культур (пшеница (*Triticum aestivum*), овес (*Avena*), гречиха (*Fagopyrum*)). Тестовые участки с древесной растительностью расположены на территории государственного природного заповедника «Столбы» (Красноярский край). Изучаемые посевы сель-

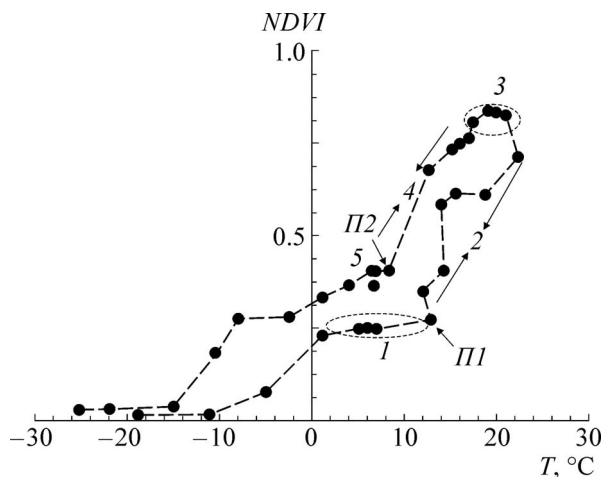


Рис. 1. Обобщенный фазовый портрет растительного объекта в пространстве $(T, NDVI)$. Цифры у кривой указывают фенологическую фазу: 1 – отсутствие вегетации, предвегетационный период, 2 – рост биомассы наземных органов (первый этап вегетационного периода), 3 – сезонный максимум биомассы, 4 – осенняя окраска, увядание листьев, 5 – послевегетационный период, III, II – начало и окончание вегетации растительности.

скохозайственных культур расположены на территории Алтайского района республики Хакасия и Минусинского района Красноярского края.

Верификацию спутниковых данных проводили по данным полевых геоботанических описаний [7] и многолетним данным фенологических наблюдений, полученных на заповедных территориях по программе «Летописи природы» [8].

Изучение фазовых портретов растительных объектов, построенных в двумерном пространстве значений T и $NDVI$, проводили по данным спутникового прибора Modis (спутники Terra и Aqua), с пространственным разрешением 250 м (продукты MOD09Q1, MYD09Q1, MOD11A2, MYD11A2). Исследование основывается на комплексном анализе спутниковой информации по результатам измерений в красном (620–670 нм) и ближнем инфракрасном (841–876 нм) оптических диапазонах совместно с данными о радиационной температуре, восстановленными по измерениям радиометром Modis в тепловых инфракрасных каналах № 31 (10,780–11,280 мкм) и № 32 (11,770–12,270 мкм).

Предварительную [9] и тематическую обработку спутниковой информации проводили с помощью специализированного программного обеспечения, разработанного на основе языка IDL 6.0 (Interactive Data Language).

В ходе тематической обработки спутникового изображения проводили расчет средних значений $NDVI_{\text{mean}}$ и средних значений радиа-

ционной температуры T_{mean} за восьмисуточный период по данным приборов Modis/Terra и Modis/Aqua.

Расчет $NDVI$ базируется на данных красного (RED) и ближнего инфракрасного (NIR) диапазонов оптического спектра [10]:

$$NDVI = \frac{NIR - RED}{NIR + RED}, \quad (1)$$

$$NDVI_{\text{mean}} = \frac{NDVI_{\text{Aday}} + NDVI_{\text{Tday}}}{2}, \quad (2)$$

где $NDVI_{\text{Aday}}$ – значение $NDVI$, полученное по данным Modis/Aqua в дневное время, $NDVI_{\text{Tday}}$ – значение $NDVI$, полученное по данным Modis/Terra в дневное время.

$$T_{\text{mean}} = \frac{T_{\text{Aday}} + T_{\text{Anight}} + T_{\text{Tday}} + T_{\text{Tnight}}}{4}, \quad (3)$$

где T_{Aday} – значение радиационной температуры в °C, полученное по данным Modis/Aqua в дневное время, T_{Anight} – по данным Modis/Aqua в ночное время, T_{Tday} – по данным Modis/Terra в дневное время, T_{Tnight} – по данным Modis/Terra в ночное время.

РЕЗУЛЬТАТЫ И ОБСУЖДЕНИЯ

Проведение комплексного анализа отражательных и излучательных характеристик растительных объектов открывает новые возможности дистанционного мониторинга фенологической изменчивости растительности. Использование показателя $NDVI$ позволяет оценивать физиологическое состояние, динамику фитопигментов и биологическую продуктивность растений [10]. Радиационная температура, восстановленная по спутниковым данным, дает информацию о температуре поверхности исследуемого объекта (верхней границы растительного покрова, почвы).

В течение сезонного развития растительное сообщество неоднократно претерпевает изменения состояния – фазовые переходы (распускание почек, начало цветения и т.д.). Рассмотрим изменение фазовых траекторий агрофитоценозов и древесной растительности в пространстве $(T, NDVI)$.

Анализ полученных данных показал, что форму фазовой кривой $y = NDVI(T)$ растительного объекта условно можно разделить на несколько зон.

1. Форма участка фазовой кривой в виде плато в начале вегетационного периода свидетельствует об отсутствии вегетации (участок I на рис. 1). В отличие от естественной растительности, посев семян сельскохозяйственных

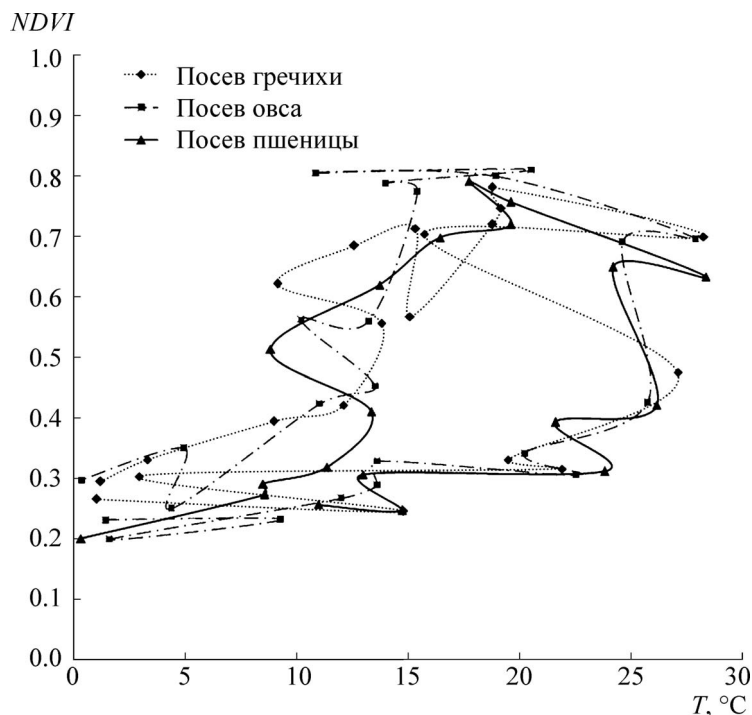


Рис. 2. Фазовые траектории посевов сельскохозяйственных культур в пространстве $(T, NDVI)$, 2006 г.

культур производится в физически спелую почву. Естественная растительность не столь требовательна к состоянию почвы. Процесс ее выхода из состояния зимнего покоя начинается при первом оттаивании корнеобитаемого слоя почв. Наличие открытой почвы (без растительного покрова) продолжительный период времени отражается на форме фазового портрета растительности посевов сельскохозяйственных культур в виде характерного плато (рис. 2). Ход кривой нарушается только тогда, когда растения накапливают требуемый для их роста объем тепловой энергии (точка *III* на рис. 1). Критическая точка *III* в функционировании фитоценоза свидетельствует о начале вегетации растительности.

2. Преодолев порог, скорость прироста биомассы наземных органов резко увеличивается. Это отражается на всех кривых фазовых портретов в виде многократного увеличения значений *NDVI* (участок 2 на рис. 1). Посевы сельскохозяйственных культур переходят в фенологическую фазу всходов, древесная растительность – распускания почек.

3. Кривая фазового портрета на участке 3 (рис. 1) имеет вытянутую вдоль оси абсцисс форму. Следовательно, основной вклад в формирование кривой вносит изменчивость значений радиационной температуры (от +10°C до +30°C). Значения *NDVI* изменяются незначительно. Для посевов сельскохозяйственных культур

увеличение данных значений (на 10–12%) обусловлено увеличением общего проективного покрытия в связи с ростом генеративных органов (рис. 2). Значения *NDVI* древесной растительности изменяются не более чем на 4–5% (рис. 3).

4. Участок 4 кривой фазового портрета (рис. 1) отражает доминирование деструктивных процессов у древесных растений (смена окраски и листопад). Посевы сельскохозяйственных культур находятся в стадии созревания, происходит налив и созревание зерна. Переход от восковой стадии созревания до полной спелости сопровождается уменьшением общего проективного покрытия, сменой аспекта растений (от зеленого до желтого), увеличением количества ветоши и мортмассы. Критическая точка в функционировании фитоценоза *II2* свидетельствует об окончании вегетации растительности.

5. Участок 5 кривой фазового портрета (рис. 1) отражает процессы после вегетационного периода – посевы сельскохозяйственных культур убраны, окончание листопада, отмирание листьев.

Обработка полученных данных показала возможность автоматического определения времени начала и окончания вегетации растительности (без привлечения геоботанических описаний). Для этого необходимо произвести расчет величины угла наклона α скользящей пря-

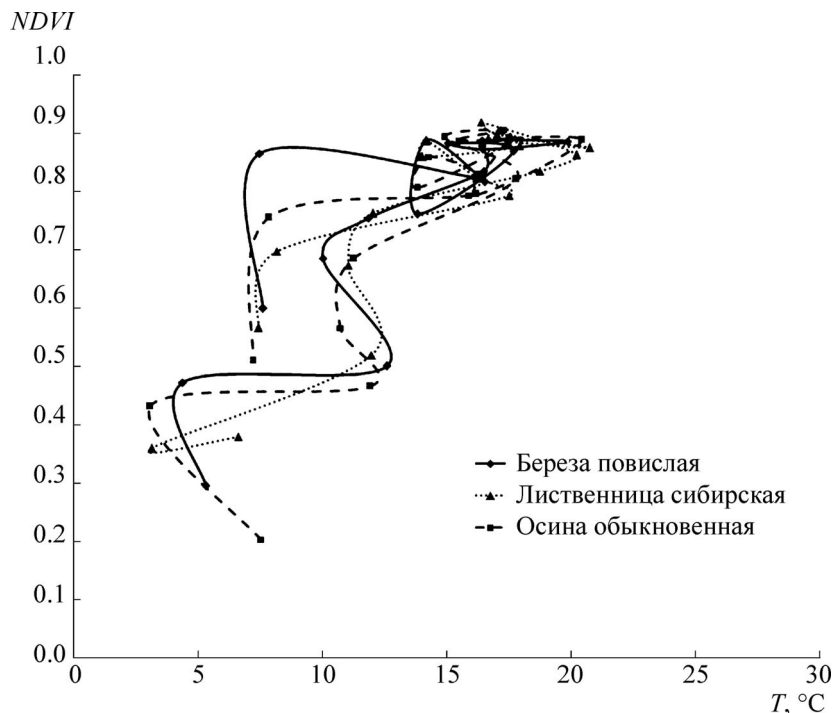


Рис. 3. Фазовые траектории древесной растительности в пространстве $(T, NDVI)$, 2003 г.

мой, проходящей через каждые три точки фазового портрета с единичным шагом. В расчете необходимо рассмотреть все значения в интервале от $NDVI_0$ до $NDVI_{0,5}$ ($NDVI_0$ – значения NDVI с температурой выше $+5^\circ\text{C}$ при условии, что во все последующие дни температура выше 0°C ; $NDVI_{0,5}$ – значения NDVI не более 0,5). Началом и концом вегетации считаются даты с максимальными величинами углов наклона скользящих прямых, построенных между фазами 1–2 и 4–5 соответственно.

Установлено, что различия в расстоянии между кривыми, обозначающими фазы 2 и 4, фазовых портретов и продолжительность фазы 1 позволяют однозначно определять тип растительности (растительность сельскохозяйственных посевов, хвойная или лиственная древесная растительность).

Метеорологические отличия вегетационных периодов 2003 и 2006 гг. (более поздний переход среднесуточной температуры воздуха через порог $+5^\circ\text{C}$ в 2006 г. (на 12 дней), количество выпавших в 2006 г. осадков в среднем на 22% превышает количество выпавших осадков в 2003 г.) обусловили и отличия фазовых портретов исследуемых растительных объектов (рис. 4). Установлено, что изменчивость среднесуточной температуры приводит к смещению фазовой траектории вдоль оси абсцисс, дефицит влаги приводит к смещению траектории вдоль оси ординат, за счет снижения количества зе-

ленной биомассы (в течение фазы 3 – сезонного максимума биомассы).

ВЫВОДЫ

1. Проведен анализ фенологической изменчивости растительности юга Красноярского края и республики Хакасии в течение периодов вегетации 2003 и 2006 гг.

2. Выявлены отличительные особенности фазовых портретов агрофитоценозов и древесной растительности в пространстве $(T, NDVI)$.

3. Установлено, что изучение фазовых портретов растительности позволяет повысить информативность имеющихся данных NDVI и радиационной температуры. Становится возможным определение границ фенологических состояний фитоценоза, области перехода из одного состояния в другое.

4. Разработан алгоритм расчета времени начала и окончания вегетационного периода на основе комплексного анализа отражательных и излучательных характеристик растительных объектов.

Авторы признательны администрации Государственного заповедника «Столбы» за предоставленные данные о фенологическом развитии растительности. Данные по фенологии были собраны сотрудником заповедника Н.П. Должковой.

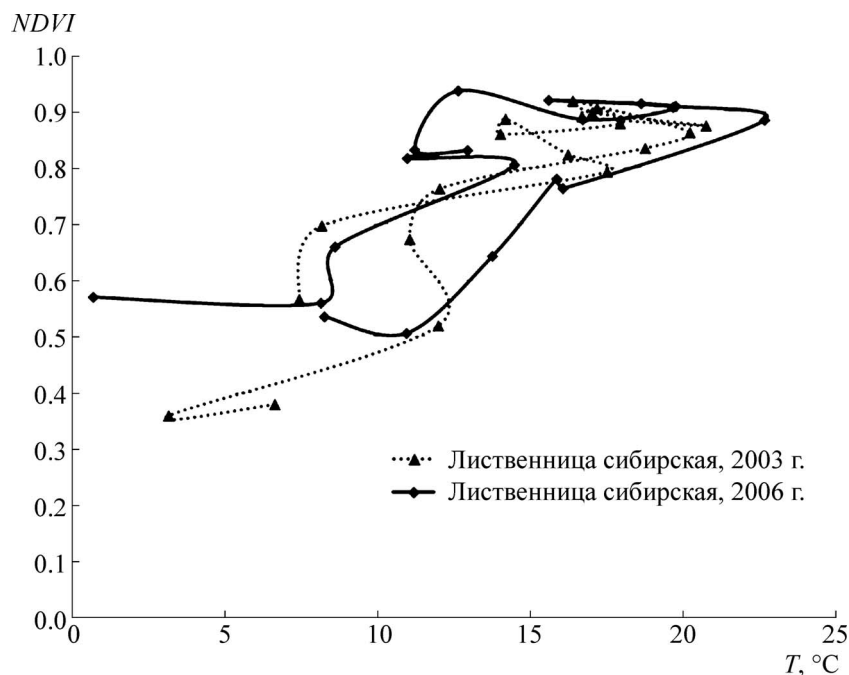


Рис. 4. Фазовые траектории лиственницы сибирской (*Larix sibirica*), в течение периодов вегетации 2003 и 2006 гг.

Исследование выполнено при финансовой поддержке Российского фонда фундаментальных исследований в рамках научного проекта № 16-37-00281 мол_а.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. R. B. Myneni., C. D. Keeling, C. J. Tucker, et al., *Nature* **386**, 698 (1997).
2. J. Bogaert, L. Zhou, C. J. Tucker, et al., *J Geophys. Res.* **107** (D11), 4119, 10.1029/2001JD001075 (2002).
3. X. Zhang, A. F. Mark, B. S. Crystal, et al., *Remote Sensing of Environment* **84**, 471 (2003).
4. J. I. Fisher, J. F. Mustard, and M. A. Vadeboncoeur, *Remote Sensing of Environment* **100** (2), 265 (2006).
5. G. Hmimina, E. Dufrêne, J.-Y. Pontailier, et al., *Remote Sensing of Environment* **132**, 145 (2013).
6. S. Kim, S. Kang, J.-H. Lim, et al., *Ecol. Model.* **247**, 190 (2012).
7. Е. Ю. Жукова, А. П. Шевырнов, В. М. Жукова и др., *Вестн. Томского гос. ун-та* **323**, 354 (2009).
8. Т. М. Овчинникова, В. А. Фомина, Е. Б. Андреева и др., *Хвойные бореальной зоны* **28** (1–2), 54 (2011).
9. I. Yu. Pugacheva, A. F. Sid'ko, and A. P. Shevyrnogov, *Adv. Space Res.* **45**, 1224 (2010).
10. D. W. Deering, Ph. D. Dissertation (Texas A & M University, College Station, TX, 1978).

Study of Phenological Variability of Terrestrial Ecosystems in the South of the Krasnoyarsk Territory and Khakassia, Based on Satellite Data

I.Yu. Botvich and A.P. Shevyrnogov

*Institute of Biophysics, Siberian Branch, Russian Academy of Sciences,
Akademgorodok 50/50, Krasnoyarsk, 660036 Russia*

The patterns of phase portraits of vegetation (agrophytocenosis, woody vegetation) constructed using two-dimensional space radiation temperature values and Normalized Difference Vegetation Index were studied. The analysis of the phenological variability of vegetation in the south of the Krasnoyarsk Territory and the Republic of Khakassia during growing seasons of 2003 and 2006 was carried out. Distinctive features of the phase portraits of agrophytocenosis and woody vegetation were revealed. The possibility of determining the boundaries of phenological states in phytocenosis, an area of the transformation from one state into another was shown. Based on the complex analysis of the reflective and radiative properties of the plant samples, the algorithm for calculating the start and end of the growing season was developed.

Keywords: satellite data, phenology, agricultural crops, woody vegetation