

О связи фенологического развития растительности таежной зоны с величиной NDVI, определенной по спутниковым данным

М.А. Медведева¹, В.В. Елсаков², И.Ю. Савин¹, С.А. Барталёв¹

¹*Институт космических исследований РАН,
117997 Москва, Профсоюзная 84/32*

E-mail: smis@d902.iki.rssi.ru;

²*Институт биологии Коми НЦ УрО РАН
167982 Сыктывкар, ГСП-2, ул. Коммунистическая, 28
E-mail: elsakov@ib.komisc.ru*

Продолжительность вегетационного сезона является важной биоклиматической характеристикой, определяющей продуктивность наземных экосистем, параметры процессов энергомассообмена между поверхностью суши, атмосферой и другими компонентами геосистемы. В статье проводится сопоставление результатов определения времени начала и окончания сезона вегетации на основе спутниковых данных NOAA AVHRR и SPOT-VEGETATION с данными полевых фенологических наблюдений, полученными для территории северо-востока Европейской части России.

Ключевые слова: дистанционное зондирование, NDVI, фенология растительности

Введение

Продолжительность вегетационного сезона или, другими словами, периода года, в течение которого происходят основные этапы роста и развития растений, является важной биоклиматической характеристикой, определяющей продуктивность наземных экосистем, параметры процессов энергомассообмена между поверхностью суши, атмосферой и другими компонентами геосистемы. Данные о границах вегетационного сезона необходимы для моделирования динамики растительности и прогноза урожайности сельскохозяйственных культур, используются для планирования лесохозяйственной и сельскохозяйственных деятельности. Эти характеристики также часто используются в качестве индикаторов последствий глобального потепления [1, 2] ввиду их высокой чувствительности к климатическим вариациям и короткого времени отклика.

С появлением спутниковых приборов, обеспечивающих ежедневные глобальные наблюдения (NOAA-AVHRR, SPOT-Vegetation, Terra/Aqua-MODIS), возникла возможность дистанционного определения моментов начала и окончания активной фазы сезонного развития растительности на основе анализа временных рядов спектральных вегетационных индексов (NDVI, OVNI и других), коррелирующих с объемом зеленой биомассы, величиной листового индекса и концентрацией хлорофилла [3].

Следует отметить, что предложенные к настоящему времени алгоритмы определения по спутниковым данным границ вегетационного сезона базируются на существенно различающихся принципах и не обеспечивают получение согласованных между собой

оценок [4-6], что, в свою очередь, накладывает ограничения на возможности практического использования получаемых результатов.

Для изучения взаимосвязи глобальных климатических изменений и динамики растительного покрова Северной Евразии коллективом ИКИ РАН в рамках проекта CLIVT (Climate Induced Vegetation Change Analysis Tool) при поддержке Microsoft Research был разработан метод определения границ вегетационного сезона на основе данных дистанционного зондирования и приземной температуры воздуха [7]. В предлагаемой статье излагаются результаты валидации данного метода с использованием архива полевых данных, полученных для территории тайги севера-востока Европейской части России.

Объект исследований

Исследования были проведены для территории Печоро-Илычского биосферного заповедника, расположенного на стыке Русской равнины и Уральской горной страны, в переходной зоне между средней и северной тайгой. На своеобразие климата, характер распределения растительного покрова территории во многом оказывает влияние Уральский горный хребет, имеющий меридиональную направленность и ограничивающий территорию с востока. В растительном покрове равнинной части заповедника господствуют темнохвойные леса, сложенные видами сибирской полидоминантной тайги [8]. Территория является эталоном растительности boreальных девственных лесов с абсолютным доминированием равнинных, низкогорных и горных елово – пихтовых с примесью кедра, травянисто – кустарниковых зеленомошных лесов [9]. Сосновые леса сформированы на участках боровых террас и на заболоченных территориях и бедно представлены в регионе. Лиственные леса немногочисленны, приурочены к поймам рек и участкам восстанавливавшихся гарей. На участках высокогорий прослеживаются высотные смены лесов горными тундрами и каменистыми россыпями.

В основу анализа положено использование использования временных рядов спектрального вегетационного индекса NDVI, полученных по результатам спутниковых наблюдений NOAA-AVHRR (набор данных GIMMS) за период 1982-2006 лет, имеющих временную частоту наблюдений раз в 15 дней и пространственное разрешение 8 км (http://gimms.gsfc.nasa.gov/ndvi/ndvie/GIMMSdocumentation_NDVIe.pdf), а также стандартного продукта S10 SPOT-Vegetation (VEGETATION portal: <http://www.spot-vegetation.com>) (далее SPOT), имеющего пространственное разрешение 1,15 км и временное - один раз в 10 дней за период с апреля 1998 года по декабрь 2006 года.

Второй важной компонентой информационной основы являются архивы наземных данных девяти станций наблюдений на территории Печоро-Илычского государственного природного заповедника Республики Коми, полученные за период 1982-2006 годов.

Наблюдения проводились за признаками фенологического развития растительности, периодами схода и установления снежного покрова, за наступлением первых и последних заморозков. Для прослеживания фенологических изменений растений недалеко от кордона выбирался постоянный маршрут с фиксированными площадками. Исследования осуществлялись регулярно два раза в неделю, а в период появления бутонов и цветения – практически ежедневно. Место расположения станций наблюдений представлено на рисунке 1.

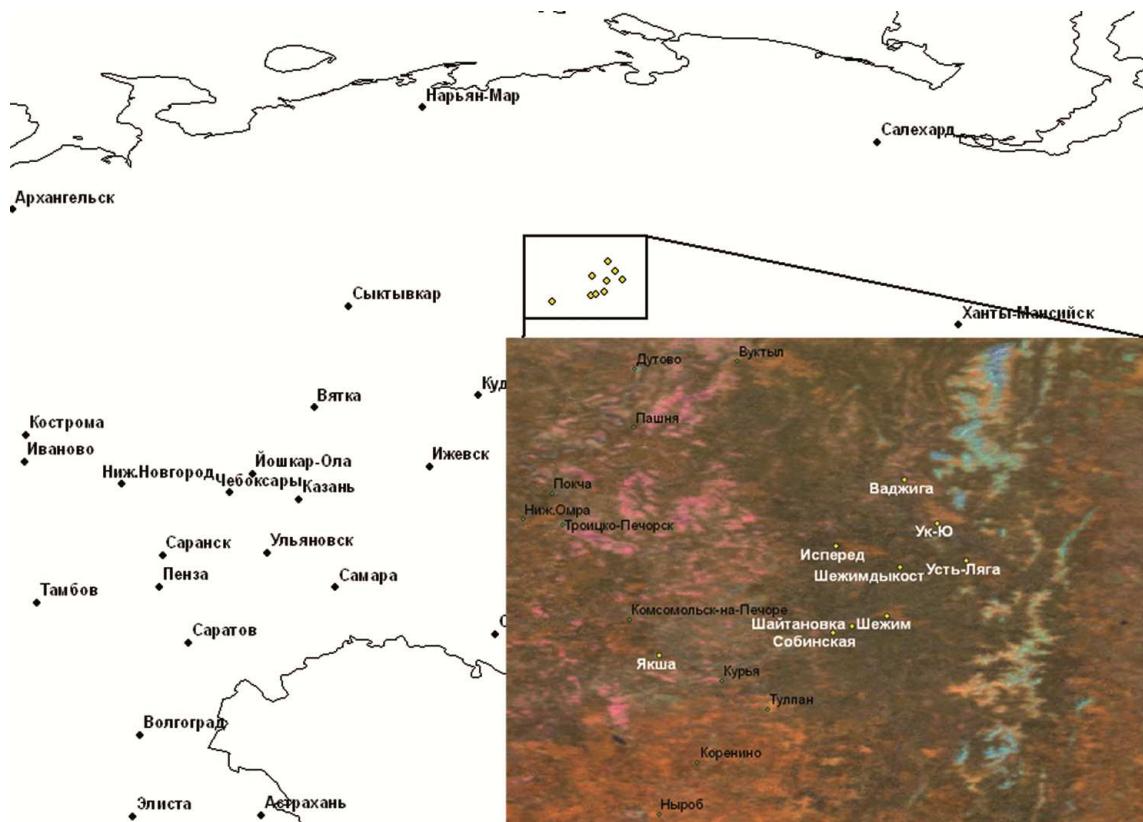


Рис. 1. Место расположения станций наблюдений на территории Печоро-Илычского государственного природного заповедника Республики Коми (названия станций даны белым цветом)

Метод исследований

На базе двух источников данных о значении индекса NDVI (NOAA и SPOT) были определены границы вегетационного сезона с использованием рядов среднесуточной температуры ECMWF ERA-40 (European Centre of Medium-range Weather Forecast, Reading, England) с пространственным разрешением 1° (<http://www.ecmwf.int/research/era/ERA-40/Products/index.html>).

Для интеграции метеорологические и вегетационные данные были приведены к единому временному и пространственному разрешению. Исходные спутниковые данные (декадные SPOT и пятнадцатидневные NOAA) были линейно интерполированы во времени до ежедневных, а у метеорологических было повышенено пространственное разрешение до значения соответствующей характеристики исходной спутниковой информации.

Метод определения начала вегетационного сезона основан на комплексном анализе согласованных временных рядов спутниковых и метеорологических данных. При этом в качестве начала вегетационного сезона принимается момент времени, после которого вегетационный индекс имеет устойчивый положительный прирост за два последовательных промежутка времени при условии выполнения следующей совокупности дополнительных условий:

- Значение NDVI на левой границе рассматриваемого временного интервала превышает экспериментально полученное фиксированное пороговое значение $P_1^{ndvi} = 0,14$, условно соответствующее открытой почве;
- Значение NDVI на левой границе рассматриваемого временного интервала превышает пороговое значение P_2^{ndvi} , в качестве которого принимается величина вегетационного индекса, соответствующая, согласно уравнению экспоненциальной аппроксимации, переходу температуры воздуха через 0°C ;
- Среднесуточная температура воздуха в день, соответствующий левой границе рассматриваемого временного интервала, и в течение четырех последующих дней должна превышать 0°C .

Фиксированное пороговое значение, соответствующее открытой почве, было получено путём осреднения во времени и пространстве значений многолетних серий NDVI на базе данных SPOT в наборе точек, где в течение года не было отмечено связанной с вегетацией динамики исследуемого индекса.

Перечень ограничений схематично представлен на рисунке 2. Метод определения окончания сезона вегетации был аналогичен представленному выше.

На основании анализа данных по пикселям изображения составленной временной серии, в которые попадали станции наземных наблюдений, были построены графики многолетней динамики дат начала и окончания вегетационного сезона за период с 1999 по 2006 год. На построенные графики накладывалась результаты наземных наблюдений о различных фенологических состояниях имеющихся типов растительного покрова, параметрах снежного покрова, наличии заморозков вблизи фенологических границ. Были вы-

явлены наиболее близкие к определённым по спутниковым данным фенологическим границам даты наступления различных природных явлений.

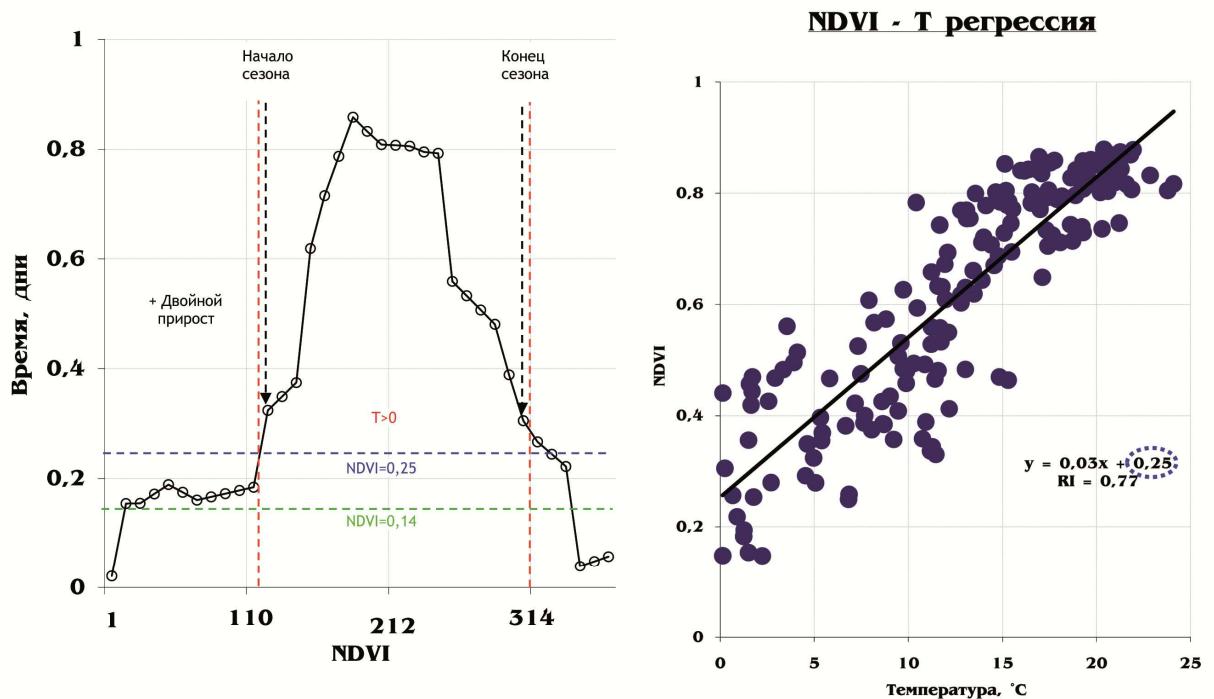


Рис. 2. Пороговые ограничения для оценки границ вегетационного периода на основе рядов NDVI и температуры. Зелёная пунктирная линия - пороговое ограничение по открытой почве, синяя пунктирная линия - адаптивное ограничение на значение NDVI (уравнение регрессии в каждом пикселе), красная пунктирная линия - ограничение на положительные значения температур

Результаты и обсуждение

Примеры временных серий, отображающих многолетнюю динамику показателя "дата начала вегетации", полученного на основании использования обоих типов спутниковой информации, и наземных данных для ряда станций, представлены на рисунке 3. Степень синхронности дат, определенных по спутниковым данным, с результатами полевых наблюдений показана в таблице 1.

Для всех станций наиболее близкие к моменту начала вегетации, определенному по спутниковым данным, оказались параметры "первые полевые проталины" и "начало сокодвижения у берёзы".

Определенное по спутниковым данным SPOT начало сезона вегетации более точно соотносится с показателями "первые полевые проталины" и "начало сокодвижения у берёзы", чем определенные по NOAA даты на большинстве станций. Хотя разница не является существенной.

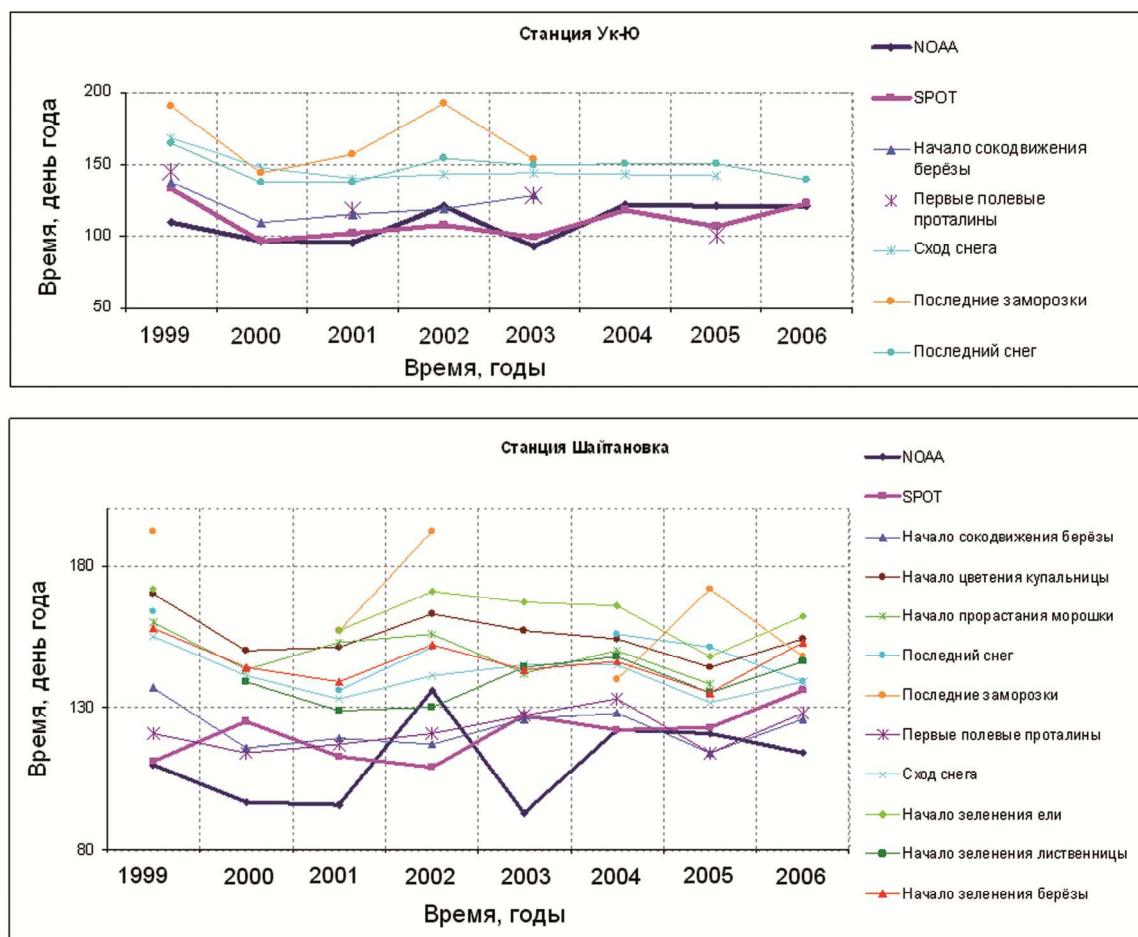


Рис. 3. Даты начала сезона вегетации по спутниковым данным и полевые наблюдения для некоторых станций

Таблица 1. Сравнительная оценка определённой по спутнику даты начала вегетации с данными наземных наблюдений

Среднее значение показателя и стандартное отклонение на станции	Показатель							
	Начало вегетации по SPOT	Начало вегетации по NOAA	Первые полевые проталины	Начало сокодвижения у берёзы	SPOT-первые полевые проталины	SPOT-начало сокодвижения у берёзы	NOAA-первые полевые проталины	NOAA-начало сокодвижения у берёзы
Якша	113±14	104±14	-	114±6	-	-1±9	-	-10±12
Шайтановка	121±9	111±14	122±6	123±7	-1±9	-2±11	-11±14	-12±17
Ук-Ю	111±12	110±12	123±16	122±9	-13±13	-12±9	-18±23	-16±13
Шежим	125±8	109±11	-	116±5	-	9±6	-	-7±13
Шежимдыкост	121±12	115±18	-	122±21*	-	-9±20	-	-6±10
Усть-Ляга	121±12	114±11	-	124±9	-	-4±9	-	-9±10
Исперед	115±12	111±14	112±8*	124±8	8±13	-9±14	15±6	-10±16
Ваджига	116±13	122±14	-	126±9	-	-11±12	-	-3±17

"-" - Наземные данные отсутствуют. *Наличие меньше половины исследуемой временной серии данных.

Статистический анализ показал, что момент начала сокодвижения у берёзы очень хорошо коррелирует со сходом снежного покрова и с последним снегом (0,69-0,89), но снег сходит позже начала сокодвижения. Коэффициент корреляции дат начала сокодвижения у берёзы и появления первых полевых проталин на двух станциях около 0,6, на третьей (по трём точкам) близок к единице. Коэффициент корреляции параметров, характеризующих начало появления растительности (таких, как начало прорастания морошки, цветение купальницы, начало зеленения ели, берёзы и лиственницы), с датой начала сокодвижения у берёзы составляет 0,65-0,79, что несколько выше, чем корреляция тех же параметров со временем появления первых полевых проталин (коэффициент корреляции 0,21-0,53). При этом выделяется хорошая корреляция последнего параметра с показателем "дата начала зеленения лиственницы" (коэффициент корреляции 0,75).

Исходя из этих результатов, можно заключить, что два соответствующих определённому по дистанционным данным началу вегетации явления (образование первых полевых проталин и начало сокодвижения у берёзы) наступают достаточно синхронно и, как было определено выше, практически одновременно. Растительность начинает интенсивно развиваться ежегодно через некоторый устойчивый промежуток времени после начала сокодвижения берёзы. Проведенный анализ показывает, что на данной территории после начала сокодвижения у берёзы или появления первых полевых проталин примерно через месяц наступает первое цветение купальницы, прорастание морошки и зеленение берёзы, через 20 дней - начало зеленения лиственницы и через 40 – ели. Таким образом, определив по спутниковым данным дату начала сокодвижения у берёзы, опосредованно можно оценить и даты всех вышеназванных фенологических явлений.

Значения временных серий показателя момента **окончания вегетации** по обоим источникам спутниковой информации и наземных данных для некоторых станций представлены на рисунке 4.

Наиболее близкий к моменту окончания вегетации, определенному по спутниковым данным, оказался показатель "конец листопада лиственницы". Также близкие даты отмечаются и для таких показателей, как "конец листопада берёзы" и "первый покров поверхности снегом". Первые заморозки начинаются несколько раньше. Степень синхронности дат, определенных по спутниковым данным, с результатами полевых наблюдений показана в таблице 2.

Результаты определения дат окончания сезона вегетации по данным SPOT и NOAA характеризуются в подавляющем количестве случаев их одновременностью.

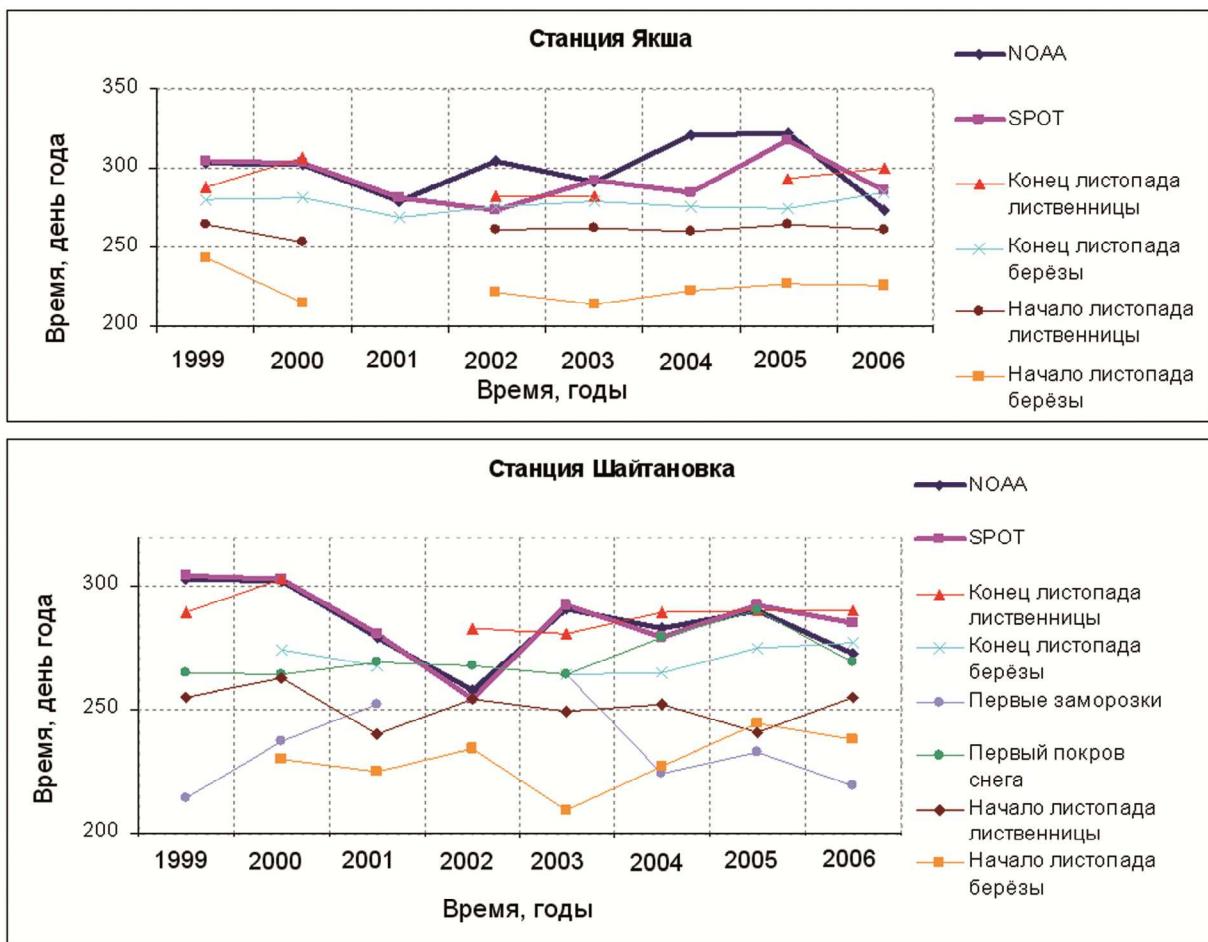


Рис. 4. Даты окончания сезона вегетации по спутниковым данным и полевые наблюдения для некоторых станций

Таблица 2. Сравнительная оценка определённой по спутнику даты окончания сезона вегетации с данными наземных наблюдений

Среднее значение показателя и стандартное отклонение на станции	Показатель											
	Конец вегетации по SPOT	Конец вегетации по NOAA	Конец листопада лиственницы	Конец листопада берёзы	Первый покров снега	SPOT - конец листопада лиственница	SPOT - конец листопада берёзы	SPOT - первый покров снега	NOAA - конец листопада лиственница	NOAA - конец листопада берёзы	NOAA - первый покров снега	
Якша	293±14	300±17	292±9	278±4	-	4±14	15±14	-	7±19	22±18	-	
Шайтановка	286±15	285±14	289±7	271±5	271±8	-2±14	18±8	15±18	-4±13	16±11	14±17	
Ук-Ю	289±9	287±11	-	277±2	269±14	-	12±13	20±12	-	11±13	18±13	
Шежим	287±12	285±14	-	277±7	279±13	-	13±8	8±15	-	9±13	6±13	
Шежимдыкост	289±10	287±11	-	268±5*	-	-	21±19	-	-	20±19	-	
Усть-Ляга	286±18	285±14	-	277±5*	-	-	6±24	-	-	11±17	-	
Исперед	290±10	287±11	-	278±0*	285±10*	-	14±0	-1±4	-	13±0	-2±4	
Ваджига	286±10	288±17	-	268±0*	287±0*	-	16±0	4±1	-	15±0	20±16	
Собинская	287±13	287±11	-	287±0*	281±10	-	11±0	5±11	-	15±0	6±11	

"-" - Наземные данные отсутствуют. *Наличие меньше половины исследуемой временной серии данных.

На основе корреляционного анализа было установлено, что по обеим станциям, у которых имелись соответствующие данные, выявляется хорошая связь дат окончания листопада берёзы и лиственницы (коэффициент корреляции немногим больше 0,5). Корреляция дат окончания листопада берёзы и лиственницы с датой появления первого снежного покрова отсутствует.

Выводы

В результате проведенных исследований было выявлено, что дата начала сезона вегетации на анализируемой территории, определенная по спутниковым данным, соответствует дате появления первых полевых проталин и дате начала сокодвижения у берёзы.

Существование надежной корреляции между датой начала сокодвижения у берёзы и некоторыми другими показателями фенологического развития растительности позволяет с определенной уверенностью на основе спутниковых данных прогнозировать для данной территории даты первого цветения купальницы, прорастания морошки и зеленения берёзы (наступают через месяц после даты начала сезона вегетации, определенной по спутниковым данным), дату начала зеленения лиственницы (через 20 дней после даты начала сезона вегетации, определенной по спутниковым данным) и дату начала зеленения ели (через 40 дней после даты начала сезона вегетации, определенной по спутниковым данным).

Дата окончания сезона вегетации, определенная по спутниковым данным, наилучшим образом соответствует дате конца листопада лиственницы.

Сравнение дат начала и окончания вегетационного сезона, полученных по спутниковым данным разного типа, показало, что определённые по данным SPOT даты более тесно согласуются с данными полевых наблюдений, чем полученные по данным NOAA даты.

Представленные результаты должны учитываться при организации долгосрочного спутникового мониторинга растительности данного региона.

Авторы благодарят администрацию Печоро-Илычского заповедника и с.н.с. Тертица Т.К. за помощь, оказанную при выполнении работы.

Литература

1. *Myneni R.B., Keeling C.D., Tucker C.J., Asrar G., Nemani R.R.* Increase plant growth in the northern high latitudes from 1981–1991 // *Nature*. 1997. № 386. P. 698–702.
2. *Bogaert J, Zhou L, Tucker CJ, Myneni RB, Ceulemans R.* Evidence for a persistent and extensive greening trend in Eurasia inferred from satellite vegetation index data // *J Geophys. Res* 107(D11). 10.1029/2001JD001075.
3. *Gobron N., Pinty B., Verstraete M., Taberner M.B.* An optimized FAPAR Algorithm Theoretical Basis Document // Italy: European Communities, 2002. 20 c.
4. *Karlsen, S.R., et al.* MODIS-NDVI-based mapping of the length of the growing season in northern Fennoscandia // *Int. J. Appl. Earth Observ. Geoinform.* 2007. doi:10.1016/j.jag.2007.10.005
5. *Reed B., Brown J.* Issues in characterizing phenology from satellite observations // Use of earth observation data for phonological monitoring. 2003. Vol. EUR 20675 EN. P. 23 – 26.
6. *Maignan F., F.-M. Breon, C. Bacour, J. Demarty, A. Poirson.* Interannual vegetation phenology estimates from global AVHRR measurements. Comparison with in situ data and applications // *Rem. Sens. Env.* 2007. Vol 112/2. P. 496-505.
7. *Медведева М.А., Барташев С.А., Лупян Е.А., Савин И.Ю., 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. Сборник научных статей. Вып.5, Том II. 2008, С. 313-321.
8. Флора и растительность Печоро-Илычского биосферного заповедника. Екатеринбург: УрО РАН, 1997. 384 с.
9. *Нейфельдт В.Н.* История и проблемы на пути развития «Печоро-Илычского биосферного заповедника» // Российские биосферные резерваты на современном этапе. М.: 2006. 231 с.

About the correlation between vegetation phenological dynamics of northern taiga and satellite based NDVI values

Maria Medvedeva¹, Vladimir² Elsakov, Igor Savin¹, Sergey Bartalev¹

Space Research Institute of Russian Academy of Sciences

117997, Moscow, 84/32 Profsoyuznaya str.

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

² Institute of biology Komi SC UrD RAS

167610, Syktyvkar, Kommunisticheskaja 28.

E-mail: elsakov@ib.komisc.ru

Duration of a vegetation season is the important bioclimatic characteristic which defines the productivity of ecosystems, parameters of mass and energy exchange processes between a land surface, atmosphere and other geosystem components. To calculate the phenological borders based on the satellite information it is necessary to have a notion about land processes corresponding to them. The method of the beginning and the end of vegetation season detection based on NDVI multi-annual series and meteorological data was applied. And this article deals with the comparison of the received results with real field observation data from Pechora-Ilych biosphere's reserve, situated in northern taiga of European part of Russia.

Keywords: remote sensing, NDVI, vegetation phenology