

Возможности оценки момента наступления вегетационного сезона на основе спутниковых и метеорологических данных

М.А. Медведева¹, С.А. Баргалёв¹, Е.А. Лупян¹, А.М. Матвеев¹, В.А. Толпин¹,
А.А. Пойда²

¹ *Институт космических исследований РАН
117997, Москва, ул. Профсоюзная, 84/32
E-mail: smis@d902.iki.rssi.ru*

² *Геофизический центр РАН
117997, Москва, ул. Профсоюзная, 84/32
E-mail: poyda@wddb.ru*

Продолжительность вегетационного сезона 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 агрокультур, планирования лесохозяйственной и сельскохозяйственной деятельности, используются в качестве индикаторов последствий климатических изменений. В статье представлен метод оценки начала вегетационного сезона для различных типов растительности на основе комбинированного использования данных спутниковых и метеорологических наблюдений, а именно анализе сезонной динамики значений вегетационного индекса NDVI по данным дистанционного зондирования и приземной температуры воздуха.

Введение

Продолжительность вегетационного сезона или, другими словами, периода года, в течение которого происходит основная жизнедеятельность 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 агрокультур, используются для планирования лесохозяйственной и сельскохозяйственной деятельности. Эти характеристики также часто используются в качестве индикаторов последствий глобального потепления [1, 2] ввиду высокого уровня их чувствительности к климатическим вариациям и короткого времени отклика на указанные изменения.

Вместе с тем, в само понятие вегетационного сезона часто вкладывается различный смысл в зависимости от предметной области и методов определения. Так, в традиционной фенологии начало вегетации определяется на основе признаков возобновления сокодвижения в растениях в весенний период, что в солнечные дни может проявляться и при отрицательной температуре верхнего слоя почвы [3]. Будучи, вероятно, наиболее объективным и незаменимым при проведении локальных фенологических наблюдений в научных и иных целях, этот метод практически не применим при оценке больших территорий.

Наиболее распространенный на практике метод определения границ вегетационного сезона основан на использовании данных метеорологических наблюдений и, прежде всего, температуры воздуха [4]. Будучи достаточно эффективным и простым в использовании, этот метод, вместе с тем, обладает существенными ограничениями. Прежде всего, давая оценку потенциальной пригодности периода по погодным условиям для активной жизнедеятельности растений, он не учитывает такие факторы, как тип растительности, качество окружающей среды (например, состав почвы и атмосферы), наличие в экосистемах природных и антропогенных возмущающих факторов (пожары, вырубки, загрязнения и т.д.).

Попытка учета региональных особенностей фенологического развития растительности привела к появлению множества определений начала вегетационного сезона по погодным условиям (http://en.wikipedia.org/wiki/Growing_season). Так в США и Канаде в качестве начала вегетационного сезона принимается дата последних заморозков или последнего перехода ночной температуры через 0°C. В ряде стран Европе под продолжительностью сезона вегетации понимается количество дней в году, в которых среднесуточная температура превышала 5°C (иногда используется 6°C). В Великобритании начало сезона вегетации считается с момента, когда приземная температура воздуха пять дней непрерывно превышала 5°C. В аридных регионах сезон вегетации определяется количеством атмосферных осадков.

С появлением спутниковых приборов, обеспечивающих ежедневные глобальные наблюдения (NOAA-AVHRR, SPOT-Vegetation, Terra/Aqua-MODIS), появились возможности дистанционного определения моментов начала и окончания активной фазы сезонного развития растительности на основе анализе временных рядов спектральных вегетационных индексов (NDVI, OVNI и других), коррелирующих с объемом зеленой биомассы, величиной листового индекса и концентрацией хлорофилла [5]. К числу факторов, ограничивающих эффективность методов дистанционной оценки вегетационного сезона, при этом, можно отнести мешающее влияние облачности, искажение регистрируемых сигналов ввиду влияния атмосферы и различий в геометрических условиях освещения и наблюдения поверхности. Необходимо также учитывать относительно низкое пространственное разрешение спутниковых приборов (250-1000 м), обеспечивающих достаточную для решения этой задачи частоту наблюдений, что делает возможным определение границ вегетационного сезона только на уровне растительных ассоциаций.

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 [6-8], что, в свою очередь, накладывает ограничения на возможности практического использования получаемых результатов.

В настоящей работе предложен подход, основанный на совместном использовании данных спутниковых и метеорологических наблюдений с целью повышения достоверности и устойчивости определения границ вегетационного сезона, а также предпринята попытка оценки критических значений температур, соответствующих началу активной фазы весеннего развития различных типов растительного покрова.

Представленные результаты получены в рамках научного проекта CLIVT, выполняемого ИКИ РАН при поддержке корпорации Майкрософт. Проект CLIVT направлен на исследование возможностей оценки реакций растительного покрова на изменения климата на основе временных рядов данных спутниковых и метеорологических наблюдений с использованием высокопроизводительных вычислительных комплексов и разработанных для этих целей специализированных программных инструментов.

Регион исследований и исходные данные

Выбранный для проведения исследований регион Северной Евразии, на территории которого в течение нескольких последних десятилетий наблюдаются значительные климатические изменения [9], отличается широким охватом различных биоклиматических условий и представленностью разнообразных типов растительного покрова, основной закономерностью пространственного распределения которых является выраженная широтная зональность. Развитие методов дистанционного изучения растительности применительно к Северной Евразии представляет собой не только научный, но и значительный практический интерес, продиктованный необходимостью сбора данных о состоянии сосредоточенных в регионе огромных растительных ресурсов в условиях отдаленности и труднодоступности значительной части территории.

В качестве исходных спутниковых данных для проведения исследований использовались стандартные продукты S10 SPOT-Vegetation, имеющие пространственное разрешение 1,15 км и охватывающие регион с координатами 42°-75° С.Ш. и 5°-180° В.Д. за период с апреля 1998 года по декабрь 2007 года. Продукты S10 формируются с использованием всех полученных за каждый десятидневный период наблюдений путем селекции пикселей с наименьшим влиянием облачности и соответствующих максимальному значению нормализованного разностного вегетационного индекса NDVI, вычисляемого согласно следующего выражения:

$$NDVI = \frac{R_{nir} - R_{red}}{R_{nir} + R_{red}},$$

где R_{red} и R_{nir} – значения коэффициента спектральной яркости, измеряемые в каналах 0,61-0,68 мкм и 0,78-0,89 мкм.

Ввиду применения атмосферной коррекции при формировании продуктов S10, значения пикселей изображений характеризуются величиной спектральной отражательной способности, приведенной к уровню верхней границы атмосферы. Для каждого пикселя изображения набор данных продуктов S10 содержит также информацию о дате и времени наблюдения, а также геометрических условиях солнечного освещения и наблюдения, выраженных соответствующими зенитными и азимутальными углами.

Предварительная оценка продуктов S10 выявила следующие их особенности:

- несмотря на процедуру максимизации NDVI влияние облачности все еще остается достаточно сильным мешающим фактором (особенно в северных регионах);
- эффект зависимости яркости изображений от геометрических условий освещения и наблюдения, вызванной неламертовскими свойствами наблюдаемой поверхности, проявляется в значительной мере и требует адекватного учета при проведении анализа.

Важной компонентой информационного обеспечения исследований являются архивы климатических данных, сформированные Национальным центром прогнозирования окружающей среды (NCEP) и Национальным центром атмосферных исследований (NCAR) США за период 1949-2006 годов, заданные в узлах регулярной сети с пространственным шагом 2.5°x2.5° при временной частоте 1 или 6 часов.

Кроме того, для проведения исследований была использована разработанная в рамках проекта GLC 2000 для решения задач оценки состояния растительного покрова применительно к изучению глобальных изменений биосферы и климата карта наземных экосистем Северной Евразии [10]. Карта включает в себя 27 классов наземных экосистем, образующих семь различных групп, таких как леса, кустарники, травянистая растительность, водно-болотные комплексы, тундра, растительные комплексы и непокрытые растительностью земли.

Предварительная обработка исходных данных

Наличие шумов во временных рядах NDVI, вызванных остаточным влиянием облачности и различиями в геометрических условиях освещения и наблюдения поверхности, требует проведения предварительной обработки спутниковых данных.

Алгоритм предварительной обработки рядов NDVI основан на сглаживании локальных «провалов» временной функции методом линейной интерполяции внутри скользящего окна переменной длины. При этом на каждом шаге в качестве левой границы временного окна выбирается текущее наблюдение отличное от локального минимума. Правая его граница, также соответствующая отличному от локального минимума наблюдению, задается таким образом, чтобы обеспечить максимально возможную длину окна, не превышающую при этом пяти последовательных наблюдений. Условием задания временного окна также является превышение значений NDVI на обеих его границах по отношению к наблюдениям внутри соответствующего временного интервала.

Результаты такой фильтрации представлены на рис. 1.

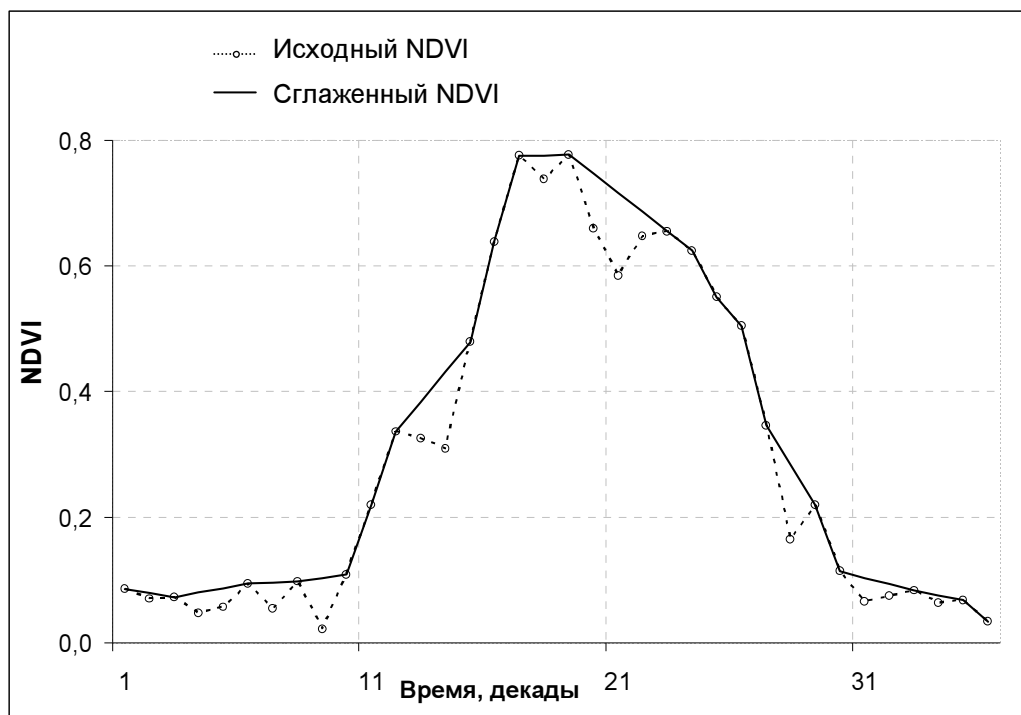


Рис. 1. Линейное сглаживание временного ряда NDVI

Этап пространственно-временной интеграции как необходимого условия обеспечения возможности совместного анализа спутниковых и метеорологических данных включает приведение этих двух источников к единому пространственному разрешению и одинаковой временной частоте наблюдений. В качестве единой пространственной единицы интеграции при этом используются границы ячеек регулярной сети, принятые при формировании базы климатических данных ($2.5^{\circ} \times 2.5^{\circ}$), а в качестве источника данных о пространственном распределении типов растительного покрова служит карта наземных экосистем Северной Евразии. При этом в каждый момент наблюдения и для каждой ячейки регулярной сети выполняется осреднение значений NDVI для пикселей, соответствующих одному типу растительности.

При исследовании сезонной динамики растительного покрова необходимо минимизировать влияние возмущающих факторов, к числу наиболее значимых из которых, в частности, относятся пожары. Поэтому при формировании интегрированной базы данных используются результаты картографирования по данным SPOT-Vegetation повреждений растительного покрова пожарами [11] с целью исключения соответствующих значений NDVI из дальнейшего анализа. Так для травяных пожаров, согласно карте наземных экосистем Северной Евразии, соответствующие значения NDVI исключались из рассмотрения всего текущего года. В случае лесных пожаров исключение соответствующих пикселей из рассмотрения осуществлялось на текущий год и весь последующий за пожаром период наблюдения.

Для согласования временной частоты спутниковых наблюдений и метеорологических измерений температуры на первом этапе были получены среднесуточные значения последних с их дальнейшим сглаживанием методом скользящего осреднения временного ряда окном длиной 11 дней. Далее производился выбор максимального значения температуры за каждый десятидневный интервал по аналогии с формированием композитных продуктов спутниковых данных S10 SPOT-Vegetation (на основе критерия максимума NDVI). Примеры согласованных временных рядов температуры и NDVI представлены на рис. 2.

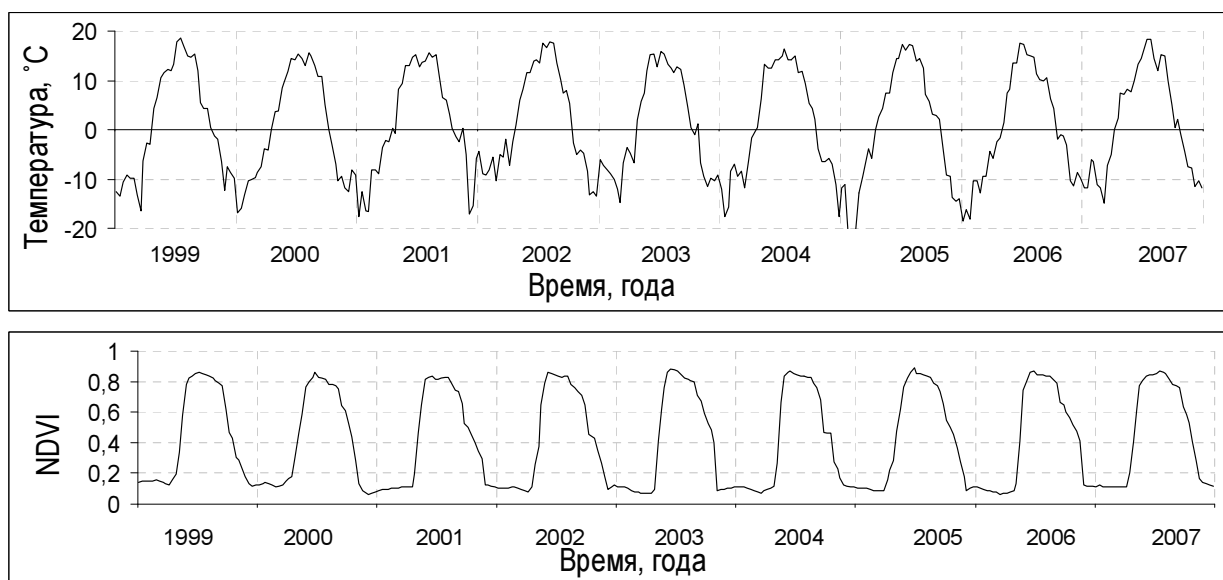


Рис. 2. Примеры временных рядов температуры воздуха и NDVI лиственных лесов за период 1999-2007 гг.

Анализ взаимосвязи значений NDVI и температуры воздуха

Для основной части территории Северной Евразии, за исключением южных районов с сухим жарким климатом, температура воздуха и почвы является определяющим фактором сезонной динамики растительного покрова. Использование интегрированной базы данных многолетних спутниковых и метеорологических наблюдений позволило оценить взаимосвязь температуры приземного воздуха и значений NDVI для различных типов растительности (см. пример на Рис. 3).

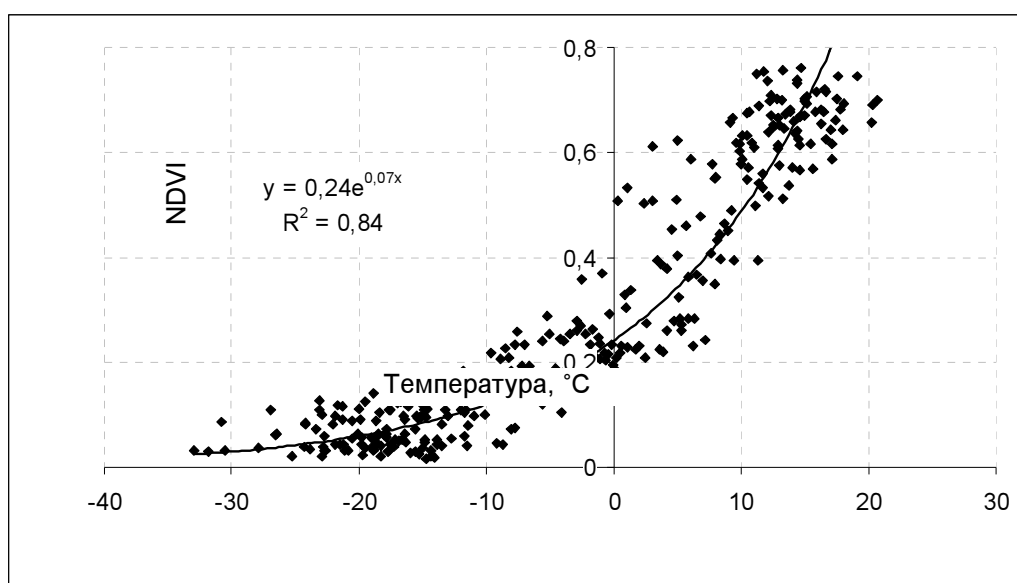
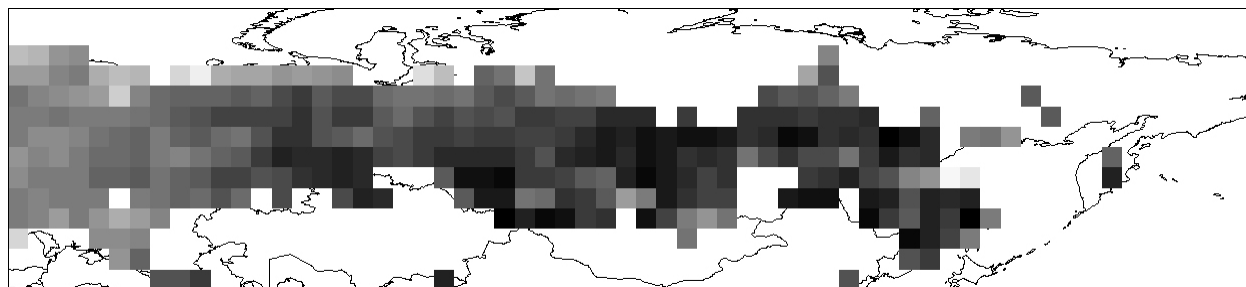


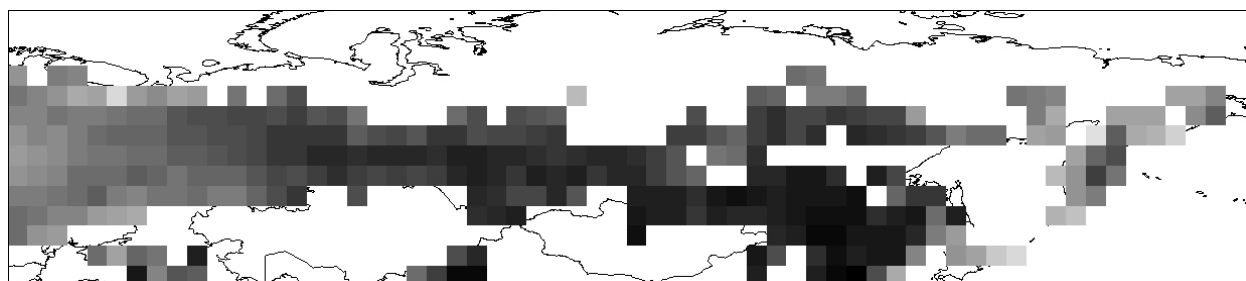
Рис. 3. Взаимосвязь значений NDVI лиственных лесов и температуры воздуха за 1999-2007 годы

Аппроксимация результатов наблюдений экспоненциальной функцией позволяет оценить в ячейках регулярной сети соответствующие переходу температуры воздуха через 0°C пороговые значения NDVI для различных типов растительности, а также оценить по величине коэффициент корреляции (Рис. 4) двух наборов данных вклад температуры, как основного климатического фактора, в сезонную динамику растительности.

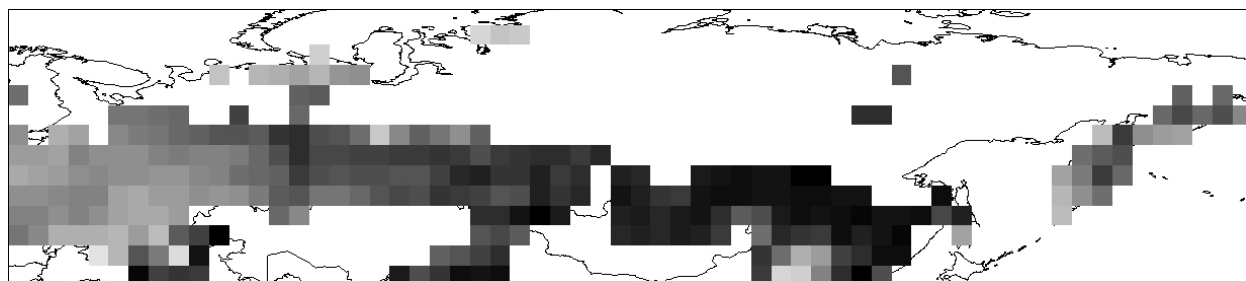
Анализ пространственного распределения величины коэффициента корреляции между многолетними значениями температуры воздуха и NDVI для приведенных на рисунке 4 типов растительного покрова показывает, что, при использовании уравнения аппроксимации экспоненциального вида, уровень тесноты связи между двумя этими величинами устойчиво ниже в Европейской части Северной Евразии, чем в регионах Сибири и Дальнего Востока. Объяснение причин этих очевидных региональных различий требует проведения дополнительного анализа с учетом возможного влияния других факторов, включая природные и антропогенные факторы возмущающего воздействия на динамику растительности.



а) хвойные вечнозелёные леса



б) лиственные леса



в) луговая растительность



Рис. 4. Значения коэффициента корреляции между температурой воздуха и NDVI различных типов растительного покрова

Оценка момента наступления вегетационного сезона

К настоящему времени из научной литературы известно несколько различных методов оценки даты начала вегетационного сезона на основе анализа сезонной динамики спектральных вегетационных индексов, получаемых по временным рядам данных спутниковых наблюдений. В числе распространенных методов оценки начала вегетационного сезона следует упомянуть такие, как [7]:

- поиск ближайшего по величине к половине от максимума в текущем году значения индекса и соответствующей ему даты (*метод половинной амплитуды*);
- определение начала сезона по дате наибольшего приращения вегетационного индекса (*метод максимума производной*);
- определение начала сезона по смене знака первой производной функции вегетационного индекса с отрицательного на положительный (*метод точки перегиба*);
- выбор в качестве начала сезона даты, соответствующей росту значения положительной первой производной по сравнению с ее положительным значением в предыдущий момент наблюдения (*метод роста производной*);
- выбор в качестве начала сезона момента, после которого вегетационный индекс испытывает прирост за два или более последовательных промежутка времени (*метод последовательного двойного роста*).

Сравнение результатов определения момента начала вегетационного сезона с использованием пяти различных методов анализа данных спутниковых наблюдений представлены на Рис. 5.

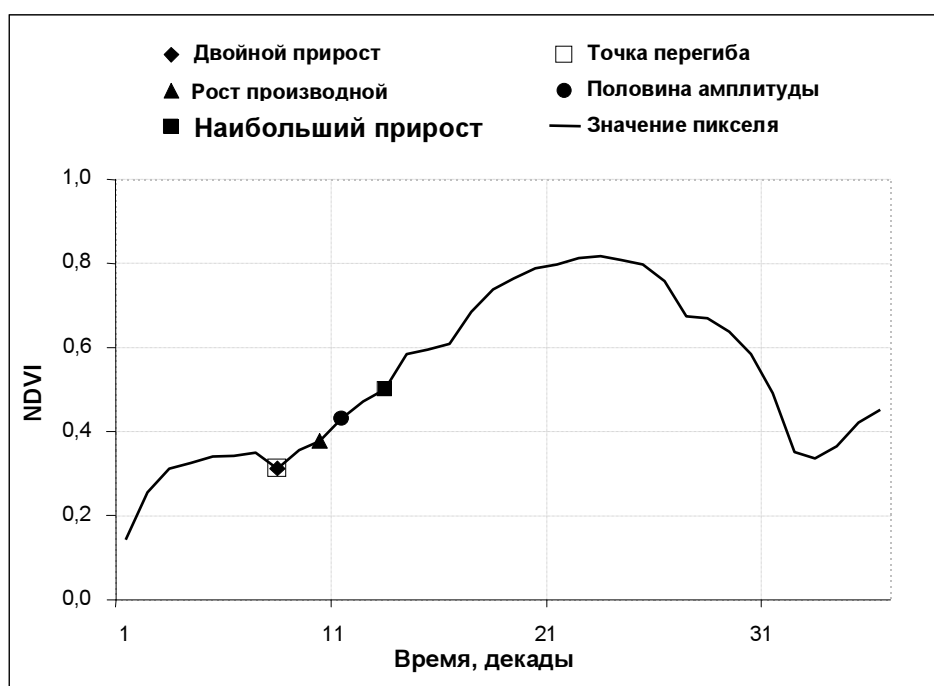


Рис. 5. Сравнение результатов определения момента начала вегетационного сезона с использованием пяти различных методов анализа данных спутниковых наблюдений

Предложенный в данном исследовании метод определения начала вегетационного сезона основан на комплексном анализе согласованных временных рядов спутниковых и метеорологических данных и выполняется с учетом типа растительного покрова. При этом в качестве начала вегетационного сезона принимается момент времени, после которого вегетационный индекс имеет прирост за два последовательных промежутка времени при условии выполнения следующей совокупности дополнительных условий:

(i) значение NDVI на левой границе рассматриваемого временного интервала превышает экспериментально полученное фиксированное пороговое значение $P_1^{ndvi} = 0,14$, соответствующее полностью лишенной растительного покрова открытой почве;

(ii) значение NDVI на левой границе рассматриваемого временного интервала превышает пороговое значение P_2^{ndvi} , задаваемое в ячейках регулярной сети с учетом типов растительного по-

крова, в качестве которого принимается величина вегетационного индекса, соответствующая, согласно уравнению экспоненциальной аппроксимации, переходу температуры воздуха через 0°C ;

(iii) среднесуточная температура воздуха в день, соответствующий левой границе рассматриваемого временного интервала, и в течение четырех последующих дней должна превышать 0°C .

Рис. 6 иллюстрирует процедуру определения начала вегетационного сезона с учетом заданной совокупности критериев.

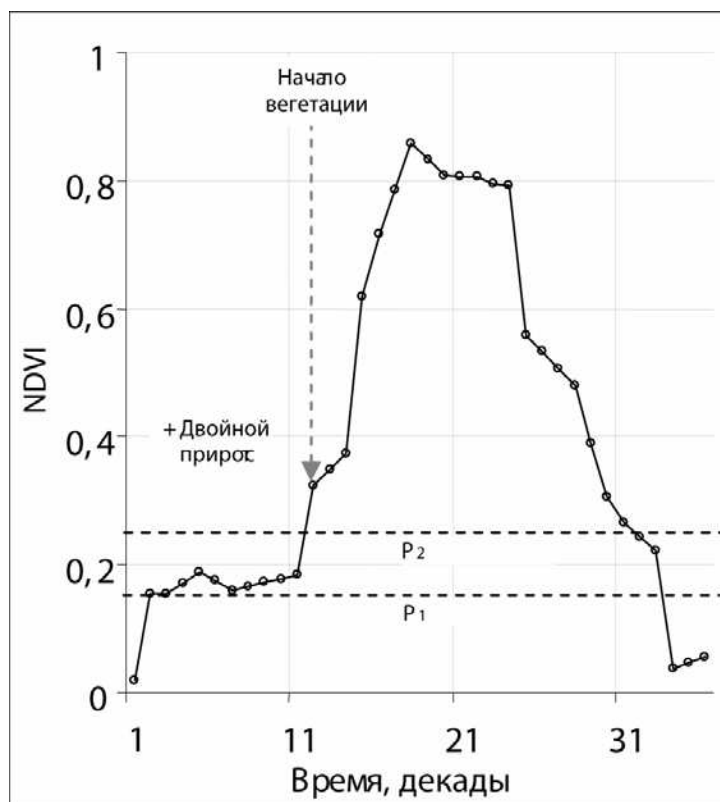


Рис. 6. Условия поиска начала сезона вегетации

Совместный анализ определенных таким образом данных о моментах наступления вегетационного сезона и динамике температурных условий открывает принципиально новую возможность оценки критических значений температуры воздуха, необходимой для начала весеннего роста различных типов растительности. Представленные в таблице 1 средние оценки критических значений температуры воздуха для начала весеннего роста некоторых типов растительности получены с использованием спутниковых данных SPOT-Vegetation за период 1999-2007 годов. Из анализа данных можно отметить незначительные различия критических значений температуры воздуха для различных типов растительности и одновременно их хорошую согласованность с имеющимися представлениями о необходимых метеорологических условиях начала вегетационного сезона.

Вместе с тем, достаточно высокий уровень среднеквадратического отклонения полученных значений критической температуры может объясняться относительно низкой для проведения такого рода исследований временной частотой наблюдений (10 дней) и тем, что за временной промежутком между двумя последовательными спутниковыми наблюдениями возможны существенные температурные вариации. Очевидно, что для получения более точных оценок значений критической температуры начала вегетационного сезона необходимо проведение дополнительных исследований с использованием ежедневных спутниковых данных.

Таблица 1. Значения температуры воздуха для некоторых типов растительного покрова, соответствующие началу вегетационного сезона по данным спутниковых наблюдений

Название класса	Ср, °С	СКО, °С
Хвойные вечнозеленые леса	4,6	1,7
Лиственные леса	4,6	1,9
Смешанные леса	4,6	1,7
Хвойные листопадные леса	3,8	1,7
Хвойные вечнозелёные кустарники	3,3	1,8
Луга	4,1	1,8

Литература

1. Мунени 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, Мунени RB, Ceulemans R. Evidence for a persistent and extensive greening trend in Eurasia inferred from satellite vegetation index data // *J Geophys.* 2002. Res 107(D11). 10.1029/2001JD001075.
3. Елагин И.Н. Времена года в лесах России // Новосибирск: Наукаю 1994. 272 с.
4. Гордеев А.В. и др. Биоклиматический потенциал России: теория и практика // М.:Т-во научных изданий КМК. 2006. 512 с.
5. Gobron N., Pinty B., Verstraete M., Taberner M.B. An optimized FAPAR Algorithm Theoretical Basis Document // Italy: European Communities, 2002. 20 с.
6. 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
7. 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.
8. Maignan F., F.-M. Bréon, 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.
9. James E. Overland, Muyin Wang, and Nicholas A. Bond. Recent Temperature Changes in the Western Arctic during Spring // *Journal of Climate.* 2002. 15(13). P. 1702–1716.
10. Bartalev, S.A., A.S. Belward, D.V. Erchov, and A.S. Isaev. A new SPOT4-VEGETATION derived land cover map of Northern Eurasia // *International Journal of Remote Sensing.* 2003. Vol. 24, No. 9, P. 1977–1982.
11. Егоров В.А., Барталев С.А., Луян Е.А., Уваров И.А. Мониторинг повреждений растительного покрова пожарами по данным спутниковых наблюдений // *Известия вузов. Геодезия и аэрофотосъемка. МИИГАиК.* Вып. 2. Москва. 2006. С. 98-109.