

Паниди Е.А.¹, Рыкин И.С.², Цепелев В.Ю.³

О ПРОБЛЕМЕ ОПРЕДЕЛЕНИЯ ВРЕМЕННЫХ ГРАНИЦ ВЕГЕТАЦИОННЫХ СЕЗОНОВ ПО ДАННЫМ НАЗЕМНЫХ НАБЛЮДЕНИЙ И ДИСТАНЦИОННОГО ЗОНДИРОВАНИЯ

АННОТАЦИЯ

Многие исследовательские задачи и задачи мониторинга природной среды требуют выполнения оценок временных границ и продолжительности вегетационных сезонов, выделяемых с учетом перехода температуры приземного воздуха через пороговые значения +5 и +10 °С. Выполнение подобных оценок на основе анализа годового хода температуры воздуха в ряде ситуаций оказывается затруднительным с учетом высокой динамики температуры и возможности продолжительных колебаний вокруг пороговых значений. Кроме того, наблюдения температуры воздуха выполняются на метеорологических станциях, сеть которых во многих случаях оказывается весьма разреженной. В результате, для выполнения оценок пространственного распределения и пространственно-ременной динамики граничных дат и продолжительности вегетационных сезонов требуется пространственная интерполяция данных, что приводит к значительным ошибкам в оценках.

В настоящей работе рассмотрен метод определения границ весеннего, летнего и осеннего вегетационных сезонов на основе анализа графиков годового хода нормализованного разностного водного индекса (NDWI), вычисление которого может быть выполнено на основе материалов спутниковых съемок. При этом могут быть построены серии карт пространственного распределения индекса, что позволяет выполнять оценку пространственной неоднородности и динамики вегетационных сезонов без применения интерполяции. В работе кратко описан метод оценки граничных дат вегетационных сезонов с использованием данных NDWI, и представлены некоторые результаты оценки соответствия определений граничных дат по данным NDWI и по данным мониторинга приземной температуры воздуха на метеорологических станциях. Сделаны выводы о вероятной согласованности оценок на основе NDWI с динамикой вегетационных фаз и о необходимости дальнейшего накопления и статистического анализа данных спутниковых и наземных наблюдений.

КЛЮЧЕВЫЕ СЛОВА: вегетационные сезоны, наземные метеорологические наблюдения, данные дистанционного зондирования, MODIS, NDWI.

¹ Санкт-Петербургский государственный университет, Институт наук о Земле, каф. картографии и геоинформатики, Санкт-Петербург, Россия, *e-mail*: panidi@ya.ru, e.panidi@spbu.ru

² Санкт-Петербургский государственный университет, Институт наук о Земле, каф. картографии и геоинформатики, Санкт-Петербург, Россия, *e-mail*: ivan.rykin94@gmail.com, st059068@student.spbu.ru

³ Российский государственный гидрометеорологический университет, Метеорологический факультет, каф. метеорологических прогнозов, Санкт-Петербург, Россия, *e-mail*: v0010200@mail.ru

Evgeny A. Panidi¹, Ivan S. Rykin², Valery Yu. Tsepelev³

**TOWARDS THE ISSUE OF ALLOCATION OF THE TIME FRAMES
FOR GROWING SEASONS USING GROUND OBSERVATIONS
AND REMOTE SENSING DATA**

ABSTRACT

Many scientific and environmental monitoring projects require estimations of the time frames and duration of the growing seasons, which allocated by detecting transition of surface air temperature through the thresholds of +5 °C and +10 °C. Such estimations usually based on the analysis of surface air temperature annual graphs. However, in a number of situations it become difficult due to the high dynamics of the temperature and to the possibility of long-term temperature fluctuations around the thresholds. In addition, observations of surface air temperature are performed at the meteorological stations, while observation network, in many cases, appears to be too sparse. As a result, spatial interpolation is required to estimate spatial distribution and spatial dynamics of time frames and duration of growing seasons, which leads to significant errors in the estimations.

In this paper, we consider a method of time frames determining for the spring, summer and autumn growing seasons on the basis of Normalized Difference Water Index (NDWI) annual graph analysis. Computation of the NDWI can be performed on the basis of satellite imagery. In this case, a map series reflecting spatial distribution of the index can be produced, which allows to estimate spatial heterogeneity and spatial dynamics of growing seasons without use of interpolation. The paper describes briefly a method applied to estimate framing dates of the growing seasons using NDWI data, and presents some results of consistency assessment of the framing dates estimations produced on the basis of NDWI and on the basis of surface air temperature monitoring at the meteorological stations. Conclusions are drawn about probable consistency of NDWI-based estimations of growing season framing dates with dynamics of vegetation phases, and about need of further accumulation and statistical analysis of satellite and ground-based observations.

KEYWORDS: Growing Seasons, Ground Meteorological Observations, Remote Sensing Data, MODIS, NDWI.

ВВЕДЕНИЕ

Под вегетационными сезонами в настоящем исследовании понимаются периоды, при которых температура приземного воздуха находится в пределах от +5 до +10 °C (весенний сезон – сезон начала вегетации), выше +10 °C (летний сезон – сезон активной вегетации) и от +10 до +5 °C (осенний сезон – сезон завершения вегетации) [Справочник по климату СССР..., 1968]. Задача определения граничных дат вегетационных сезонов достаточно часто возникает, например, при проведении исследований и изысканий в области климатологии и агрометеорологии.

Вместе с тем, известные из публикаций методы определения дат устойчивого перехода средней суточной температуры через некоторые пороговые значения заметно разнятся в получаемых результатах, не позволяя однозначно идентифицировать даты начала

¹ Saint Petersburg State University, Institute of Earth Sciences, Department of Cartography and Geoinformatics, St. Petersburg, Russia, *e-mail*: panidi@ya.ru, e.panidi@spbu.ru

² Saint Petersburg State University, Institute of Earth Sciences, Department of Cartography and Geoinformatics, St. Petersburg, Russia, *e-mail*: ivan.rykin94@gmail.com, st059068@student.spbu.ru

³ Russian State Hydrometeorological University, Meteorological Faculty, Department of Meteorological Forecasts, St. Petersburg, Russia, *e-mail*: v0010200@mail.ru

и окончания вегетационных сезонов при наличии колебаний температуры в районе порогового значения в течение некоторого количества дней. В таких случаях возникают вопросы обоснованности и достоверности рассчитанных дат смены вегетационных сезонов.

Например, весьма широко используемым в климатологии является метод Педя, предложенный в 50-х гг. прошлого столетия [Педь, 1951], который предполагает выбор устойчивой даты перехода температуры через пороговое значение, в случае наличия колебаний температуры вокруг порогового значения, на основе сравнения сумм температур, накопленных за периоды между первым и последующими переходами через пороговое значение. В качестве альтернативы, под устойчивым переходом температуры через пороговое значение может быть принят тот день, после которого не возникало обратного перехода. Вместе с тем, данные методы не позволяют достаточно четко определить даты устойчивого перехода, при наличии нескольких длительных переходов в разные стороны от порогового значения температуры [Скрынник, Сніжко, 2008]. Особенно сильно данный недостаток проявляется при определении границ вегетационных сезонов, изменение которых, в общем случае, подвержено другим факторам, помимо колебаний температуры воздуха. Наиболее сложно выполнять подобные определения в северных регионах, где температурный режим характеризуется существенными колебаниями. Отдельные исследователи предлагают определять граничные даты сезонов методом скользящего окна, осредняя даты за некоторый продолжительный промежуток времени [Скрынник О.Я., Скрынник О.А., 2009]. Такой подход позволяет сгладить колебания, вызванные погодными аномалиями, однако подразумевает невозможность выполнения определений на краях (в начале и в конце) ряда наблюдений, в связи с необходимостью осреднения данных.

Значительное количество исследований посвящено изучению взаимосвязи динамики климатических параметров и параметров растительного покрова [Stow et al., 2004; Goetz et al., 2007; Jia et al., 2009]. В данных работах сделаны выводы о наличии устойчивых взаимосвязей между динамикой температуры воздуха и, например, динамикой фитомассы кустарникового растительного покрова. Возможным решением проблемы определения граничных дат вегетационных сезонов авторы настоящего исследования видят определение границ сезонов на основе материалов спутникового мониторинга растительного покрова, в частности, на основе анализа временных серий вегетационных индексов, рассчитываемых по материалам спутниковых съемок. Подобного рода исследования известны из целого ряда публикаций, однако, другие авторы [Delbart et al., 2005; Медведева и др., 2008; Семенова, 2015] рассматривают лишь вопрос выделения границ полного сезона вегетации, без разделения на весенний, летний и осенний вегетационные сезоны.

Ранее авторами настоящего исследования был проведен ряд изысканий, связанных с оценкой взаимосвязей в динамике климатических параметров и вегетационных индексов на примере территории Республики Коми [Bobkov et al., 2015; Panidi et al., 2016; Panidi, Tsepelev, 2017]. Была предложена методика определения границ трех вегетационных сезонов на основе анализа графиков годового хода нормализованного разностного водного индекса (Normalized Difference Water Index – NDWI). Предложенная методика позволяет выполнять оценку границ сезонов на основе сеточных карт вегетационного индекса попиксельно, получая таким образом картину пространственного распределения дат вегетационных сезонов. Предварительно выявлена согласованность годового хода NDWI со средними многолетними границами вегетационных сезонов [Panidi et al., 2016], для метеорологической станции Сыктывкар данные представлены на рис. 1. Настоящая работа, в свою очередь, посвящена детализации анализа соответствия оценок границ вегетационных сезонов по спутниковым данным и по данным наземного мониторинга на метеорологических станциях.

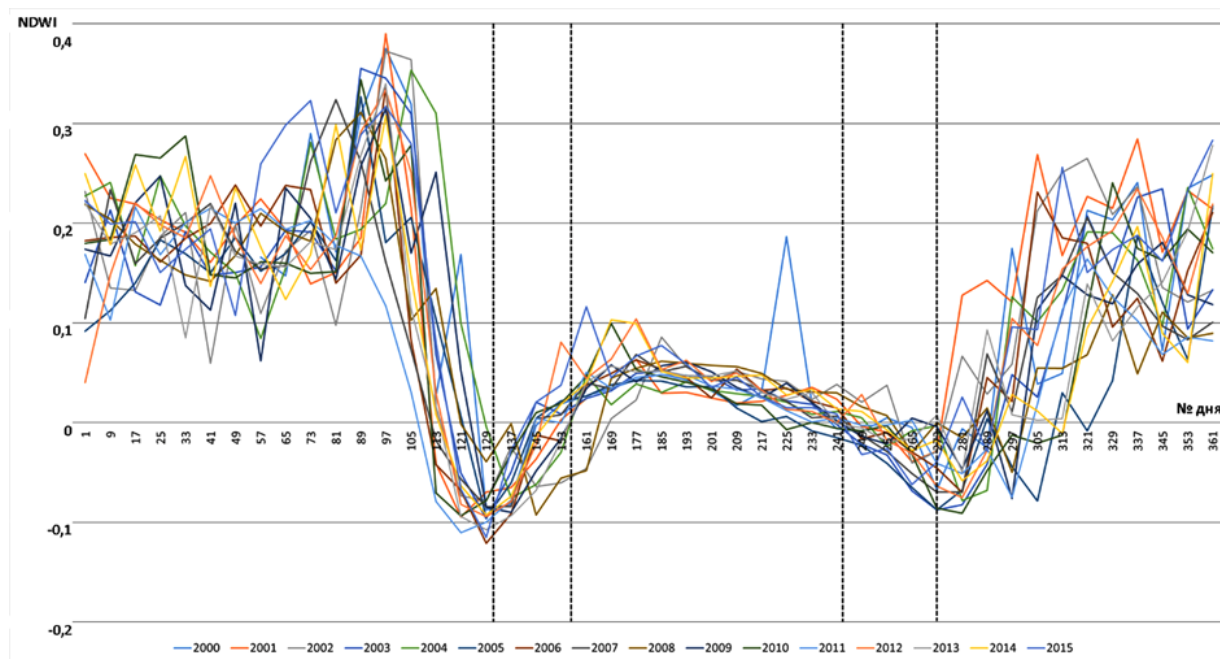


Рис. 1. Графики годового хода NDWI в 2000–2015 гг.;

Вертикальными линиями показаны усредненные границы вегетационных сезонов, определенные по данным наземных наблюдений, накопленных за указанный период

Fig. 1. Annual graphs of the surface air temperature for 2000–2015;

Vertical lines show the averaged frames of the growing seasons defined by the ground observations collected during mentioned period

МАТЕРИАЛЫ И МЕТОДЫ ИССЛЕДОВАНИЯ

NDWI рассчитывается на основе коэффициентов спектральной яркости поверхности в ближней инфракрасной и коротковолновой инфракрасной областях электромагнитного спектра. Из литературных источников известно несколько вариантов (вычислительных формул) NDWI [Sekhon et al., 2010], различающихся в части выбора длины волны, принимаемой за коротковолновое инфракрасное излучение. В настоящем исследовании NDWI рассчитывался на основе коэффициентов спектральной яркости для длин волн 0,86 μm и 1,24 μm . Данный индекс чувствителен к сезонным изменениям количества воды в жидкой фазе в тканях растений. Оригинальная вычислительная формула предложена [Gao, 1996]:

$$NDWI = \frac{\rho_{0.86} - \rho_{1.24}}{\rho_{0.86} + \rho_{1.24}}, \quad (1)$$

где $\rho_{0.86}$ – коэффициент спектральной яркости для ближней инфракрасной области спектра; $\rho_{1.24}$ – коэффициент спектральной яркости для коротковолновой инфракрасной области спектра.

Индекс рассчитывался на основе материалов спутниковой съемки MODIS. Использованы 8-дневные композиты коэффициентов спектральной яркости, полученные из архива LP DAAC – продукт MOD09A1¹. Значения индекса рассчитывались на основе каналов № 2 (0,841–0,876 μm) и 5 (1,230–1,250 μm). Процедура расчета автоматизирована с использованием инструмента ModelBuilder в среде ArcGIS for Desktop.

В качестве данных наблюдений приземной температуры воздуха использованы находящиеся в открытом доступе массивы данных РОСГИДРОМЕТА².

¹ https://lpdaac.usgs.gov/dataset_discovery/modis/modis_products_table/mod09a1_v006

² <http://aisori-m.meteo.ru/waisori/>

РЕЗУЛЬТАТЫ ИССЛЕДОВАНИЯ И ИХ ОБСУЖДЕНИЕ

При проведении ранее выполненных исследований были собраны и обобщены данные по NDWI, осредненные по 8 дней (представленные в форме восьмидневных композитов). На основе указанных данных рассчитаны графики годового хода индекса для метеорологических станций, расположенных в пределах Республики Коми. При построении графиков выполнялось осреднение значений индекса в радиусе 10 км вокруг метеорологических станций.

На текущем этапе исследований, для оценки согласованности определений границ вегетационных сезонов по спутниковым и наземным данным дополнительно построены графики годового хода приземной температуры воздуха по данным метеорологических станций. На рис. 2–6 представлены графики среднесуточной температуры для метеорологической станции Сыктывкар.

На основе рядов данных, представленных на графиках, выполнено определение границ вегетационных сезонов (отдельно по данным наблюдений температуры и отдельно по данным NDWI). Границы сезонов обозначены на графиках вертикальными линиями. Определение границ сезонов по данным наблюдений температуры выполнено с использованием метода Педя. Границы полного вегетационного сезона по данным NDWI определялись как абсолютные весенний и осенний минимумы на графиках годового хода. Границы летнего вегетационного сезона по данным NDWI определялись как точки пересечения графика NDWI за полный вегетационный сезон и линейного тренда данного графика (см. рис. 2–6). Полученные границы и продолжительность вегетационных сезонов приведены в табл. 1–3. В табл. 4 дополнительно приведены границы и продолжительность вегетационных сезонов, рассчитанные по данным наблюдений приземной температуры воздуха и NDWI, осредненных за период с 2011 по 2015 гг.

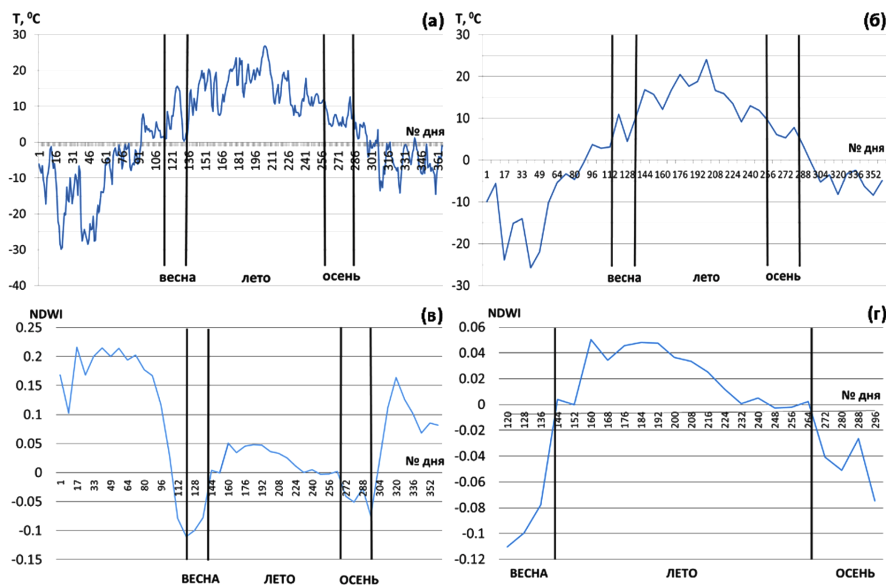


Рис. 2. Графики годового хода приземной температуры воздуха для 2011 г. – среднесуточные значения (а) и значения, осредненные за 8 дней (б); График годового хода NDWI в 2011 г. (в); График NDWI для полного вегетационного сезона 2011 г. (г); Вертикальными линиями показаны границы вегетационных сезонов, определённые по данным графикам Fig. 2. Annual graphs of the surface air temperature for 2011 – 1-day averaged values (а) and 8-day averaged values (б); Annual graph of the NDWI for 2011 (в); NDWI graph for the full growing season of 2011 (г); Vertical lines show the frames of the growing seasons defined by the graphs

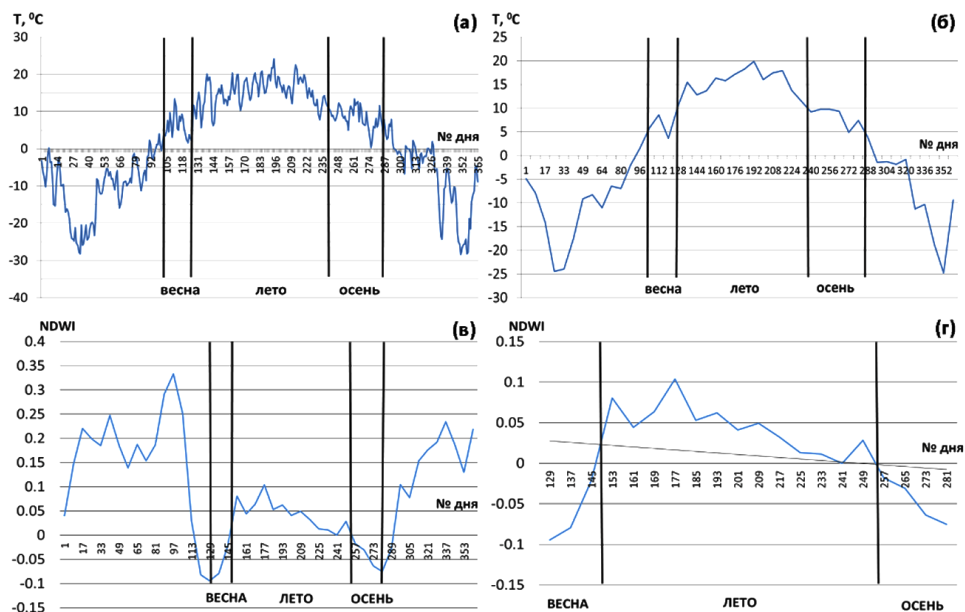


Рис. 3. Графики годового хода приземной температуры воздуха для 2012 г. – среднесуточные значения (а) и значения, осредненные за 8 дней (б); График годового хода NDWI в 2012 г. (в); График NDWI для полного вегетационного сезона 2012 г. (г); Вертикальными линиями показаны границы вегетационных сезонов, определенные по данным графикам Fig. 3. Annual graphs of the surface air temperature for 2012 – 1-day averaged values (a) and 8-day averaged values (б); Annual graph of the NDWI for 2012 (в); NDWI graph for the full growing season of 2012 (г); Vertical lines show the frames of the growing seasons defined by the graphs

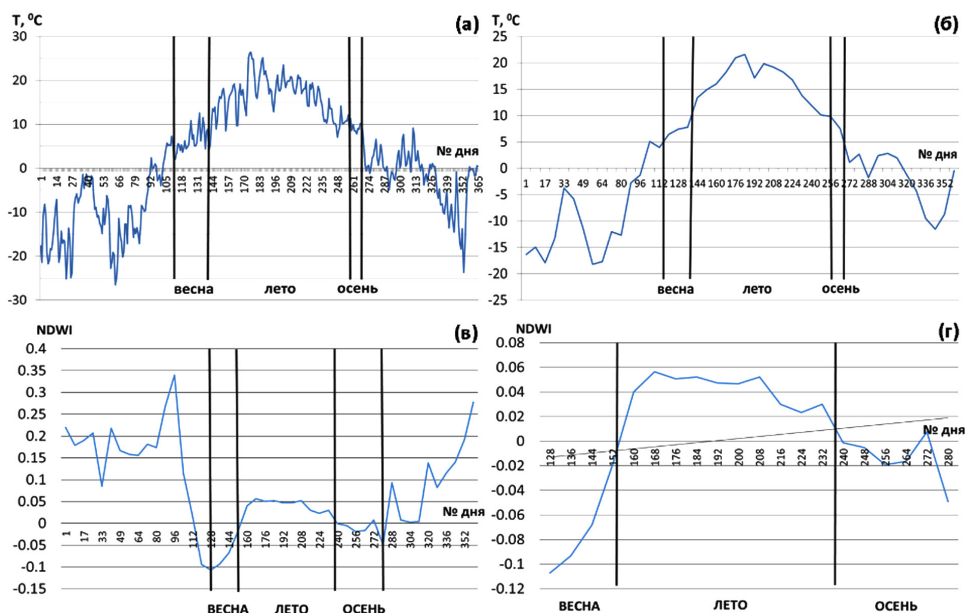


Рис. 4. Графики годового хода приземной температуры воздуха для 2013 г. – среднесуточные значения (а) и значения, осредненные за 8 дней (б); График годового хода NDWI в 2013 г. (в); График NDWI для полного вегетационного сезона 2013 г. (г); Вертикальными линиями показаны границы вегетационных сезонов, определенные по данным графикам Fig. 4. Annual graphs of the surface air temperature for 2013 – 1-day averaged values (a) and 8-day averaged values (б); Annual graph of the NDWI for 2013 (в); NDWI graph for the full growing season of 2013 (г); Vertical lines show the frames of the growing seasons defined by the graphs

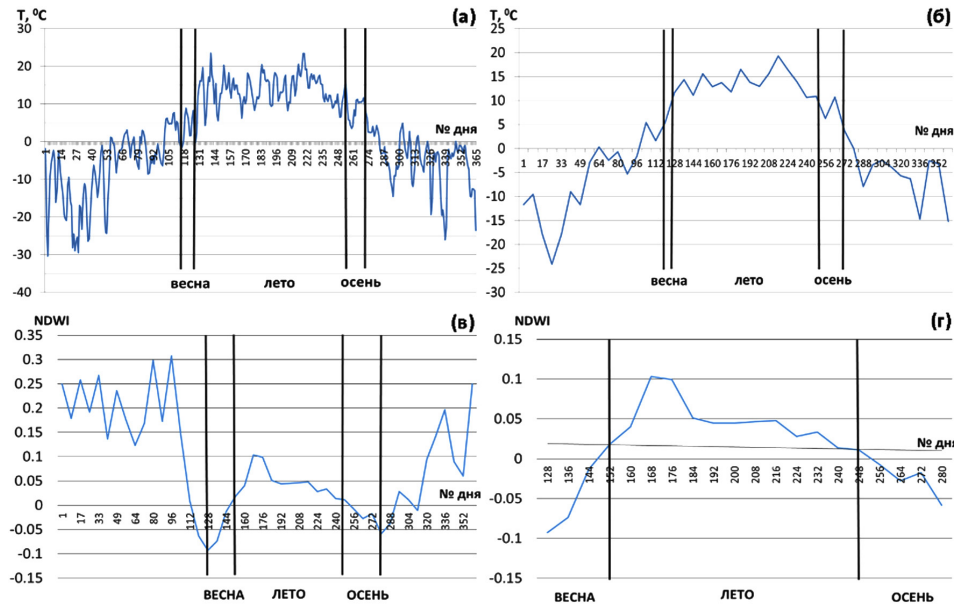


Рис. 5. Графики годового хода приземной температуры воздуха для 2014 г. – среднесуточные значения (а) и значения, осредненные за 8 дней (б); График годового хода NDWI в 2014 г. (в); График NDWI для полного вегетационного сезона 2014 г. (г); Вертикальными линиями показаны границы вегетационных сезонов, определённые по данным графикам Fig. 5. Annual graphs of the surface air temperature for 2014 – 1-day averaged values (а) and 8-day averaged values (б); Annual graph of the NDWI for 2014 (в); NDWI graph for the full growing season of 2014 (г); Vertical lines show the frames of the growing seasons defined by the graphs

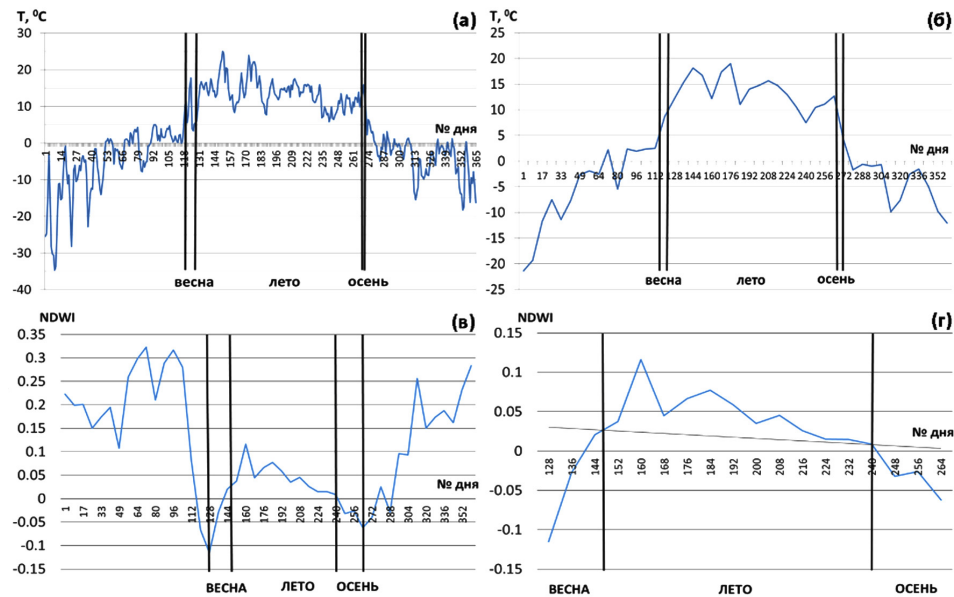


Рис. 6. Графики годового хода приземной температуры воздуха для 2015 г. – среднесуточные значения (а) и значения, осредненные за 8 дней (б); График годового хода NDWI в 2015 г. (в); График NDWI для полного вегетационного сезона 2015 г. (г); Вертикальными линиями показаны границы вегетационных сезонов, определённые по данным графикам Fig. 6. Annual graphs of the surface air temperature for 2015 – 1-day averaged values (а) and 8-day averaged values (б); Annual graph of the NDWI for 2015 (в); NDWI graph for the full growing season of 2015 (г); Vertical lines show the frames of the growing seasons defined by the graphs

Таблица 1. Границы вегетационных сезонов в 2011–2015 гг., определенные по данным среднесуточной приземной температуры воздуха

Table 1. Growing season frames for 2011–2015, defined using 1-day averaged data of surface air temperature

Начало весеннего сезона	Окончание весеннего сезона	Число дней	Начало летнего сезона	Окончание летнего сезона	Число дней	Начало осеннего сезона	Окончание осеннего сезона	Число дней
27.04.2011 (день 117)	16.05.2011 (день 136)	20	17.05.2011 (день 137)	16.09.2011 (день 259)	123	17.09.2011 (день 260)	14.10.2011 (день 287)	28
15.04.2012 (день 106)	06.05.2012 (день 127)	22	07.05.2012 (день 128)	29.08.2012 (день 242)	115	30.08.2012 (день 243)	13.10.2012 (день 287)	45
25.04.2013 (день 115)	22.05.2013 (день 142)	28	23.05.2013 (день 143)	16.09.2013 (день 259)	117	17.09.2013 (день 260)	26.09.2013 (день 269)	10
29.04.2014 (день 119)	09.05.2014 (день 129)	11	10.05.2014 (день 130)	13.09.2014 (день 256)	127	14.09.2014 (день 257)	30.09.2014 (день 273)	17
29.04.2014 (день 119)	10.05.2015 (день 130)	12	11.05.2015 (день 131)	28.09.2015 (день 271)	141	29.09.2015 (день 272)	02.10.2015 (день 275)	4

Таблица 2. Границы вегетационных сезонов в 2011–2015 гг., определенные по данным осредненной по 8 дней приземной температуры воздуха

Table 2. Growing season frames for 2011–2015, defined using 8-day averaged data of surface air temperature

Начало весеннего сезона	Окончание весеннего сезона	Число дней	Начало летнего сезона	Окончание летнего сезона	Число дней	Начало осеннего сезона	Окончание осеннего сезона	Число дней
22.04.2011 (день 114)	15.05.2011 (день 135)	22	16.05.2011 (день 136)	11.09.2011 (день 254)	119	12.09.2011 (день 255)	11.10.2011 (день 284)	30
12.04.2012 (день 102)	10.05.2012 (день 130)	29	11.05.2012 (день 131)	26.08.2012 (день 238)	108	27.08.2012 (день 239)	16.10.2012 (день 290)	52
30.04.2013 (день 120)	24.05.2013 (день 144)	25	25.05.2013 (день 145)	17.09.2013 (день 260)	116	18.09.2013 (день 261)	29.09.2013 (день 272)	12
01.05.2014 (день 121)	09.05.2014 (день 129)	9	10.05.2014 (день 130)	12.09.2014 (день 255)	126	13.09.2014 (день 256)	01.10.2014 (день 274)	19
30.04.2015 (день 120)	08.05.2015 (день 128)	9	09.05.2015 (день 129)	21.09.2015 (день 264)	136	22.09.2015 (день 265)	29.09.2015 (день 272)	8

При анализе полученных данных обращает на себя внимание хорошая согласованность (в основном разница составляет менее 8 дней – периода осреднения NDWI) границ полного вегетационного сезона, рассчитанных на основе многолетних рядов наблюдений (данные осреднены за 15 лет), запаздывание дат смены сезонов, определенных по NDWI, по сравнению с датами, определенными на основе наблюдений температуры, а также в ряде случаев сокращение продолжительности летнего сезона и увеличение осеннего и весеннего, определенных по данным NDWI, по сравнению с определенными на основе наблюдений температуры.

Таблица 3. Границы вегетационных сезонов в 2011–2015 гг., определенные по данным осредненных по 8 дней значений NDWI

Table 3. Growing season frames for 2011–2015, defined using 8-day averaged NDWI values

Начало весеннего сезона	Окончание весеннего сезона	Число дней	Начало летнего сезона	Окончание летнего сезона	Число дней	Начало осеннего сезона	Окончание осеннего сезона	Число дней
01.05.2011 (день 121)	23.05.2011 (день 143)	23	24.05.2011 (день 144)	20.09.2011 (день 263)	120	21.09.2011 (день 264)	24.10.2011 (день 297)	34
08.05.2012 (день 129)	27.05.2012 (день 148)	20	28.05.2012 (день 149)	10.09.2012 (день 254)	106	11.09.2012 (день 255)	07.10.2012 (день 281)	27
09.05.2013 (день 129)	01.06.2013 (день 152)	24	02.06.2013 (день 153)	24.08.2013 (день 236)	84	25.08.2013 (день 237)	08.10.2013 (день 281)	45
09.05.2014 (день 129)	31.05.2014 (день 151)	23	01.06.2014 (день 152)	04.09.2014 (день 247)	96	05.09.2014 (день 248)	08.10.2014 (день 281)	34
09.05.2015 (день 129)	25.05.2015 (день 146)	18	26.05.2015 (день 146)	27.08.2015 (день 239)	94	28.08.2015 (день 240)	22.09.2015 (день 265)	26

Таблица 4. Границы вегетационных сезонов, определенные по данным среднесуточной приземной температуры воздуха, осредненным за период 2001–2015 гг. (а) и по данным 8-дневных значений NDWI, осредненным за период 2001–2015 гг. (б)

Table 4. Growing season frames defined using surface air temperature averaged averaged for the period of 2001–2015 (a) and NDWI values averaged for the period of 2001–2015 (б)

	Начало весеннего сезона	Окончание весеннего сезона	Число дней	Начало летнего сезона	Окончание летнего сезона	Число дней	Начало осеннего сезона	Окончание осеннего сезона	Число дней
(а)	30 апреля (день 120)	16 мая (день 136)	17	17 мая (день 137)	9 сентября (день 252)	116	10 сентября (день 253)	30 сентября (день 273)	21
(б)	8 мая (день 128)	1 июня (день 152)	25	2 июня (день 153)	27 августа (день 239)	87	28 августа (день 240)	29 сентября (день 272)	33

Последняя особенность требует дополнительных исследований и привлечения более продолжительных рядов наблюдений. Что же касается первых двух, необходимо отметить, что предварительно оцененная на предыдущих этапах исследований согласованность средних многолетних границ вегетационных сезонов, определяемых по наземным наблюдениям температуры воздуха и по данным NDWI, вновь обработанными данными подтверждается. Запаздывание же дат смены вегетационных сезонов, выявленных по данным NDWI, по сравнению с выявленными по данным наблюдений температуры воздуха, вероятно, может быть объяснено инертностью растительного покрова и запаздыванием отклика на изменение температуры воздуха. Хорошим примером является 2011 г., на температурных графиках которого просматриваются продолжительные колебания значений температуры воздуха вокруг пороговых значений, как весной, так и осенью. При этом все границы сезонов 2011 г., выявленные по NDWI, заметно смещены по времени. Подобные смещения дат, по предварительным оценкам, выглядят обоснованными, и позволяют сделать предварительное заключение о, вероятно, более точном соответствии смены вегетационных сезонов, определяемой по данным NDWI, смене вегетационных фаз растительного покрова.

ВЫВОДЫ

Преимущество применения данных ДЗЗ состоит во временном и пространственном разрешении, а также в величине охвата территории изучения, так как плотность гидрометеорологической сети в некоторых регионах мала, что не позволяет изучать динамику изменения климата с высокой дискретностью и точностью. При использовании спутниковых съемок, кроме того, появляется возможность оценивать пространственное распределение и пространственно-временную динамику дат смены и продолжительности вегетационных сезонов, представляя оценки в форме карт.

Приведенные в настоящей работе данные позволяют сделать предварительные выводы об обоснованности применения NDWI для оценки дат смены и продолжительности вегетационных сезонов, а также о более высоком соответствии оценок, выполненных подобным образом, динамике вегетационных фаз растительного покрова. Однако исследование требует продолжения, необходимы накопление и обработка более продолжительных рядов данных, и выполнение более представительных статистических оценок.

БЛАГОДАРНОСТИ

Исследование выполнено при поддержке РФФИ и РГО, проект № 17-05-41118 РГО_a.

Данные MOD09A1 V006 получены с помощью онлайн-версии программного обеспечения LP DAAC2Disk download manager из онлайн-архива NASA EOSDIS Land Processes Distributed Active Archive Center (LP DAAC), USGS/Earth Resources Observation and Science (EROS) Center, Sioux Falls, South Dakota, https://lpdaac.usgs.gov/data_access/daac2disk.

ACKNOWLEDGEMENTS

The study was funded by the joint project of Russian Foundation of Basic Research and Russian Geographical Society, No 17-05-41118 RGO_a.

The MOD09A1 V006 dataset was retrieved from the online LP DAAC2Disk download manager, courtesy of the NASA EOSDIS Land Processes Distributed Active Archive Center (LP DAAC), USGS/Earth Resources Observation and Science (EROS) Center, Sioux Falls, South Dakota, https://lpdaac.usgs.gov/data_access/daac2disk.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. *Медведева М.А., Барталёв С.А., Лунян Е.А., Матвеев А.М., Толпин В.А., Пойда А.А.* Возможности оценки момента наступления вегетационного сезона на основе спутниковых и метеорологических данных // Современные проблемы дистанционного зондирования Земли из космоса. 2008. Вып. 5. Т. 2. С. 313–321.
2. *Педь Д.А.* Об определении дат устойчивого перехода температуры воздуха через определенные значения // Метеорология и гидрология. 1951. № 10. С. 38–39.
3. *Семенова І.Г.* Синоптичні та кліматичні умови формування посушливих явищ в Україні. Дисертація на здобуття наукового ступеня доктора географічних наук. 2015. 296 с. (на украинском языке).
4. *Скрынник О.А., Сніжко С.І.* Задача визначення дати стійкого переходу приземної температури повітря через певне фіксоване значення (аналіз методів) // Український гідрометеорологічний журнал. 2008. № 3. С. 56–66 (на украинском языке).
5. *Скрынник О.Я., Скрынник О.А.* Климатологический метод определения даты устойчивого перехода средней суточной температуры воздуха через заданное пороговое значение // Метеорология и гидрология. 2009. № 10. С. 90–99.
6. *Справочник по климату СССР. Вып. 1. Архангельская и Вологодская области, Карельская и Коми АССР. Ч. 2. Температура воздуха и почвы.* Л.: Гидрометиздат, 1968. 360 с.

7. *Bobkov A., Panidi E., Torlopova N., Tsepelev V.* NDVI Dynamics of The Taiga Zone in Connection with Modern Climate Changes. *The International Archives of the Photogrammetry, Remote Sensing and Spatial Information Sciences*. 2015. V. XL-7/W3. P. 157–163. DOI: 10.5194/isprsarchives-XL-7-W3-157-2015.
8. *Delbart N.J-P., Kergoats L., Le Toan T., Lhermitte J., Picard G.* Determination of Phenological Dates in Boreal Regions Using Normalized Difference Water Index. *Remote Sensing of Environment*. 2005. V. 97(1). P. 26–38. DOI: 10.1016/j.rse.2005.03.011.
9. *Gao B.C.* NDWI A Normalized Difference Water Index for Remote Sensing of Vegetation Liquid Water From Space. *Remote Sensing of Environment*. 1996. V. 58(3). P. 257–266.
10. *Goetz S.J., Mack M.C., Gurney K.P., Randerson J.T., Houghton R.A.* Ecosystem responses to recent climate change and fire disturbance at northern high latitudes: observations and model results contrasting northern Eurasia and North America. *Environmental Research Letters*. 2007. V. 2, No 4. 045031. 9 p. DOI: 10.1088/1748-9326/2/4/045031.
11. *Jia G.J., Epstein H.E., Walker D.A.* Vegetation greening in the Canadian Arctic related to decadal warming // *Journal of Environmental Monitoring*. 2009. No 11. P. 2231–2238.
12. *Panidi E., Tsepelev V.* NDWI-based Technique for Detection of Change Dates of the Growing Seasons in Russian Subarctic. *The International Archives of the Photogrammetry, Remote Sensing and Spatial Information Sciences*. 2017. V. XLII-3/W2. P. 179–182. DOI: 10.5194/isprs-archives-XLII-3-W2-179-2017.
13. *Panidi E., Tsepelev V., Torlopova N., Bobkov A.* Mapping of the Land Cover Spatiotemporal Characteristics in Northern Russia Caused by Climate Change. *The International Archives of the Photogrammetry, Remote Sensing and Spatial Information Sciences*. 2016. V. XLI-B8. P. 997–1002. DOI: 10.5194/isprs-archives-XLI-B8-997-2016.
14. *Sekhon N.S., Hassan Q.K., Sleep R.W.* A Remote Sensing Based System to Predict Early Spring Phenology Over Boreal Forest // *The International Archives of the Photogrammetry, Remote Sensing and Spatial Information Sciences*. 2010. V. XXXVIII. Part 1. 5 p.
15. *Stow D.A., Hopea A., McGuire D., Verbylac D., Gamond J., Huemmliche F., Houston S., Racine C., Sturm M., Tapeh K., Hinzman L., Yoshikawai K., Tweedie C., Noylek B., Silapaswan C., Douglasm D., Griffith B., Jiao G., Epstein H., Walker D., Daeschner S., Petersen A., Zhou L., Myneni R.* Remote sensing of vegetation and land-cover change in Arctic Tundra Ecosystems. *Remote Sensing of Environment*. 2004. No 89. P. 281–308.

REFERENCES

1. *Bobkov A., Panidi E., Torlopova N., Tsepelev V.* NDVI Dynamics of The Taiga Zone in Connection with Modern Climate Changes. *The International Archives of the Photogrammetry, Remote Sensing and Spatial Information Sciences*. 2015. V. XL-7/W3. P. 157–163. DOI: 10.5194/isprsarchives-XL-7-W3-157-2015.
2. *Delbart N.J-P., Kergoats L., Le Toan T., Lhermitte J., Picard G.* Determination of Phenological Dates in Boreal Regions Using Normalized Difference Water Index. *Remote Sensing of Environment*. 2005. V. 97(1). P. 26–38. DOI: 10.1016/j.rse.2005.03.011.
3. *Gao B.C.* NDWI A Normalized Difference Water Index for Remote Sensing of Vegetation Liquid Water From Space. *Remote Sensing of Environment*. 1996. V. 58(3). P. 257–266.
4. *Goetz S.J., Mack M.C., Gurney K.P., Randerson J.T., Houghton R.A.* Ecosystem responses to recent climate change and fire disturbance at northern high latitudes: observations and model results contrasting northern Eurasia and North America. *Environmental Research Letters*. 2007. V. 2, No 4. 045031. 9 p. DOI: 10.1088/1748-9326/2/4/045031.
5. *Jia G.J., Epstein H.E., Walker D.A.* Vegetation greening in the Canadian Arctic related to decadal warming. *Journal of Environmental Monitoring*. 2009. No 11. P. 2231–2238.

6. *Medvedeva M.A., Bartalev S.A., Lupyan E.A., Matveev A.M., Tolpin V.A., Poida A.A.* The possibility of estimation of the growing season onset on the basing on satellite and meteorological data. *Sovremennye problemy distantsionnogo zondirovaniya Zemli iz kosmosa*. 2008. V. 5, issue 2. P. 313–321 (in Russian).
7. *Panidi E., Tsepelev V.* NDWI-based Technique for Detection of Change Dates of the Growing Seasons in Russian Subarctic. *The International Archives of the Photogrammetry, Remote Sensing and Spatial Information Sciences*. 2017. V. XLII-3/W2. P. 179–182. DOI: 10.5194/isprsarchives-XLII-3-W2-179-2017.
8. *Panidi E., Tsepelev V., Torlopova N., Bobkov A.* Mapping of the Land Cover Spatiotemporal Characteristics in Northern Russia Caused by Climate Change. *The International Archives of the Photogrammetry, Remote Sensing and Spatial Information Sciences*. 2016. V. XLI-B8. P. 997–1002. DOI: 10.5194/isprs-archives-XLI-B8-997-2016.
9. *Ped' D.A.* About determination of dates of steady air temperature transition through certain values. *Meteorologiya i gidrologiya*. 1951. No 10. P. 38–39 (in Russian).
10. *Sekhon N.S., Hassan Q.K., Sleep R.W.* A Remote Sensing Based System to Predict Early Spring Phenology Over Boreal Forest. *The International Archives of the Photogrammetry, Remote Sensing and Spatial Information Sciences*. 2010. V. XXXVIII. Part 1. 5 p.
11. *Semenova I.G.* Synoptic and Climatic Conditions of Formation of Arid Phenomena in Ukraine. Doctoral thesis. 2015. 296 p. (in Ukrainian).
12. *Stow D.A., Hopea A., McGuire D., Verbylac D., Gamond J., Huemmriche F., Houghton S., Racinef C., Sturmg M., Tapeh K., Hinzman L., Yoshikawai K., Tweediej C., Noylek B., Silapaswanl C., Douglasm D., Grifhth B., Jiao G., Epsteino H., Walkerp D., Daeschnera S., Petersena A., Zhouq L., Myneni R.* Remote sensing of vegetation and land-cover change in Arctic Tundra Ecosystems. *Remote Sensing of Environment*. 2004. No 89. P. 281–308.
13. *Skrynyk O.A., Snizhko S.I.* The issue of determining of the surface air temperature stable transition dates through a certain fixed value (analysis of methods). *Ukrai'ns'kyj gidrometeorologichnyj zhurnal*. 2008. No 3. P. 56–66 (in Ukrainian).
14. *Skrynnik O.Ya., Skrynnik O.A.* Climatological method for determining of the date of average daily air temperature steady transition through a given threshold. *Meteorologiya i gidrologiya*. 2009. No. 10. P. 90–99 (in Russian).
15. USSR climate reference book, issue 1. Arkhangelsk and Vologda regions, Karelian and Komi ASSR. Part. 2. air and soil temperature. L.: Gidrometeoizdat, 1968. 360 p. (in Russian).