

Е.А. Паниди¹, В.Ю. Цепелев², Е.Г. Капралов³, Н.Б. Штыкова⁴

К ВОПРОСУ ОБ ОПРЕДЕЛЕНИИ ДАТ СМЕНЫ ВЕГЕТАЦИОННЫХ СЕЗОНОВ ПО ДАННЫМ ВЕГЕТАЦИОННЫХ ИНДЕКСОВ

АННОТАЦИЯ

Задача мониторинга календарных дат смены вегетационных сезонов ранее традиционно решалась с использованием данных гидрометеорологических наблюдений. Временные границы сезонов выделяются при наблюдении перехода температуры приземного воздуха через то или иное маркерное значение, например, +5 °С или +10 °С. В случае если наземная наблюдательная сеть оказывается сильно разреженной, подобный подход приводит к появлению существенных локальных искажений в оценках границ и продолжительности вегетационных сезонов. Кроме того, выделение вегетационных сезонов только на основе наблюдения температуры воздуха, комфортной для развития растений, не учитывает физиологические особенности различных их видов.

Применение спутниковых съёмок позволяет оценивать параметры растительного покрова, характеризующие состояние и развитие фитомассы. В случае использования временных рядов спутниковых снимков, являющихся результатом повторяющихся спутниковых съёмок, ставших доступными в последние десятилетия, появляется возможность распознавать моменты начала и окончания роста растительности, а также некоторые другие фенологические изменения. Авторы данной статьи исследуют вопрос применения нормализованного разностного водного индекса (NDWI), вычисляемого на основе данных спутниковых съёмок для выявления граничных дат вегетационных сезонов.

В статье рассмотрены и охарактеризованы различные подходы к реализации методов анализа графиков годового хода вегетационных индексов, и, в частности, NDWI, применяемые исследователями при выявлении характеристик вегетационных сезонов. Приведена авторская типизация данных методов. Сделан вывод о возможности применения предложенной типизации при разработке комплексной методики анализа данных вегетационных индексов в целях оценки характеристик вегетационных сезонов.

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

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

² Российский государственный гидрометеорологический университет, метеорологический факультет, кафедра метеорологических прогнозов, Санкт-Петербург, Россия, *e-mail*: v0010200@mail.ru

³ Санкт-Петербургский государственный университет, Институт наук о Земле, кафедра картографии и геоинформатики, Санкт-Петербург, Россия, *e-mail*: eugeniy.kapralov@spbu.ru

⁴ Санкт-Петербургский государственный университет, Институт наук о Земле, кафедра картографии и геоинформатики, Санкт-Петербург, Россия; *e-mail*: n.shtykova@spbu.ru

Evgeny A. Panidi¹, Valery Y. Tsepelev², Evgeny G. Kapralov³, Natalia B. Shtykova⁴

TOWARD THE ISSUE OF DETERMINING THE DATES OF THE GROWING SEASON CHANGE USING VEGETATION INDEX DATA

ABSTRACT

The task of monitoring of the growing season change dates is solved traditionally using ground meteorological observations. The time frames of the growing seasons are allocated when the surface air temperature transition through a particular marker value (e.g., +5 °C or +10 °C) is observed. When the ground observation network is sparse, such an approach leads to significant local distortions in the estimations of the change dates and duration of the growing seasons. In addition, the allocation of growing seasons based only on observation of air temperature comfortable for vegetation growth does not take into account physiological characteristics of various vegetation species.

Application of satellite imagery makes it possible to estimate vegetation cover parameters and characterize phytomass state and growth. It is possible to recognize beginning and ending of vegetation growth and some other phenological changes, as in recent decades the use of satellite imagery time series became available, which are collected using repeated satellite imaging. The authors of the paper investigate the use of Normalized Difference Water Index (NDWI) derived from satellite imagery to allocate framing dates of the growing seasons.

The paper describes and characterizes various approaches to the implementation of analysis methods used by researchers to assess annual graphs of vegetation indices (particularly NDWI) with the aim of identifying of the growing season characteristics. The typification of these methods proposed by the authors is given. Concluded the possibility of application of the proposed typification as the basis for vegetation indices analysis methodology development in order to assess the characteristics of the growing seasons.

KEYWORDS: growing seasons, ground meteorological observations, remote sensing data, MODIS, NDWI

ВВЕДЕНИЕ

Мониторинг дат смены, а также продолжительности и некоторых других параметров вегетационных сезонов востребован не только при решении задач растениеводства, что очевидно, но и в других отраслях сельского хозяйства, а также в лесном хозяйстве и при решении инженерных и научно-исследовательских задач в области экологической и природоохранной деятельности, наблюдения и изучения динамики и изменений климата. В последнем случае разработка методов мониторинга параметров вегетационных сезонов, основанных на применении дистанционных съёмок, позволяет обеспечить дополнение, а в ряде случаев замену, по крайней мере частичную, методам, основанным на применении данных наземных гидрометеорологических наблюдений. Потребность в подобных дистанционных методах исследования существует, в частности, в случаях, когда наземная наблюдательная сеть существенно разрежена территориально [Bobkov et al., 2015].

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

³ Saint Petersburg State University, Institute of Earth Sciences, Department of Cartography and Geoinformatics, St. Petersburg, Russia, *e-mail*: eugeniy.kapralov@spbu.ru

⁴ Saint Petersburg State University, Institute of Earth Sciences, Department of Cartography and Geoinformatics, St. Petersburg, Russia, *e-mail*: n.shtykova@spbu.ru

Традиционно в агрометеорологии временные границы вегетационных сезонов определяются исходя из наблюдения дат перехода температуры приземного воздуха через некоторые пороговые значения с установлением температуры, комфортной для развития растений и наращивания фитомассы.

Мониторинг температуры приземного воздуха дистанционными, в том числе спутниковыми, методами не выполняется; при этом мониторинг состояния и развития растительного покрова с применением спутниковых съёмок успешно ведётся на протяжении последних десятилетий, что позволяет выявить переход растительных сообществ из одной фенологической фазы в другую при наличии временных рядов (серий) данных спутниковой съёмки. В то же время фенологические периоды различных видов растений и растительных сообществ могут отличаться от «среднестатистических» вегетационных сезонов, выделяемых на основе наблюдений за температурой воздуха. Таким образом, «метеорологические» и «фенологические» вегетационные сезоны следует различать, в том числе с точки зрения применяемых методов мониторинга.

Вместе с тем система климат-растительность характеризуется тем, что изменения, происходящие в одной её составляющей, отражаются на другой, что позволяет, хотя и не без допущений, выполнять экстраполяцию оценок и прогнозов изменения параметров климата на оценки параметров растительного покрова и наоборот. При выполнении таких оценок и экстраполяций важным этапом является анализ временных рядов данных наблюдений, реализуемый, во многих случаях, в форме анализа графиков годового хода того или иного наблюдаемого параметра. Оценка временных границ вегетационных сезонов в таком случае связана с выявлением на графиках характерных точек и отнесением их к некоторой календарной дате.

При оценке состояния растительного покрова в целях определения фенологических фаз и их смены, как правило, используются различные вегетационные индексы, рассчитываемые в форме пространственных индексов (карт или регулярных сеток) на основе данных спутниковых съёмок и отражающие степень развития фитомассы или состояние растительного покрова. В частности, исследователи используют нормализованный разностный вегетационный индекс – NDVI [Медведева и др., 2008], коротковолновый вегетационный индекс – SWVI [Миклашевич, Барталёв, 2016], нормализованный разностный водный индекс – NDWI [Delbart et al., 2005; Sekhon et al., 2010; Семёнова, 2015; Panidi, Tsepelev, 2017].

МАТЕРИАЛЫ И МЕТОДЫ ИССЛЕДОВАНИЯ

NDWI рассчитывается на основе спектральных коэффициентов яркости земной поверхности (растительного покрова) в ближней инфракрасной и коротковолновой инфракрасной областях электромагнитного спектра. Авторами настоящего исследования использованы материалы спутниковой съёмки MODIS (продукт MOD09A1¹) и вычислительная формула, предложенная В.С. Гао:

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

где $\rho_{0.86}$ – коэффициент спектральной яркости в ближнем инфракрасном диапазоне; $\rho_{1.24}$ – коэффициент спектральной яркости в коротковолновом инфракрасном диапазоне электромагнитного спектра [Gao, 1996].

Данный индекс чувствителен к сезонным изменениям количества воды в жидкой фазе в тканях растений, что и позволяет распознавать смену «фенологических» вегетационных сезонов, анализируя годовую динамику индекса [Delbart et al., 2005; Sekhon et al., 2010; Семёнова, 2015; Panidi, Tsepelev, 2017; Паниди и др., 2018].

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

Если при определении временных границ вегетационных сезонов по данным годового хода температуры приземного воздуха ключевым аналитическим приёмом является применение метода пороговых значений, то есть определение календарных дат, в которые температура (например, среднесуточная) пересекает заданный порог, ограничивающий диапазон комфортных для растительности температур [Педь, 1951], то анализ графиков годового хода вегетационных индексов требует применения существенно более широкого инструментария. Это обусловлено, прежде всего, особенностями используемых первичных данных дистанционного зондирования, которые могут обладать худшим, по сравнению с наземными гидрометеорологическими наблюдениями, временным разрешением (зондирование конкретной территории может выполняться раз в несколько дней), а также неполнотой рядов, связанной с условиями выполнения съёмки, в частности с влиянием облачного покрова, отображаемого на снимках.

В отличие от данных наблюдений температуры воздуха, изначально представляющих собой ряды значений двумерной переменной, для которой измерениями являются собственно значение температуры и дата (либо время), в которую эта температура зафиксирована, ряды наблюдений вегетационного индекса характеризуются четырьмя измерениями, значениями индекса и даты наблюдений, а также значениями двух координат, задающих географическое положение наблюдённого значения. Такие ряды сохраняются в форме наборов растровых слоёв или многоканальных растров (каждый слой или канал описывает пространственное распределение индекса на некоторую дату съёмки).

При анализе данных вегетационных индексов выполняется отображение таких четырёхмерных переменных в двумерное координатное пространство дата/индекс, отражающее график годового хода индекса в некоторой географической точке. Следствиями подобного характера исходных данных являются отсутствие необходимости пространственной интерполяции исходных данных (либо выполненных на их основе оценок параметров вегетационных сезонов), как это делается при использовании данных температурных наблюдений, а также необходимость выполнения критически большого числа вычислений, связанных с анализом графиков годового хода индекса. Последняя особенность обусловлена тем, что построение графиков годового хода индекса (отображение в пространство дата/индекс) выполняется отдельно в каждом узле раstra (карты) вегетационного индекса. Преимуществом в данном случае является отсутствие пространственной интерполяции, приводящей к искажениям результатов, которые практически невозможно количественно оценить, а недостатками – сложность вычислений и возможность наличия неполных рядов наблюдений на отдельных графиках годового хода вегетационного индекса. Это, в свою очередь, может привести к необходимости временной или пространственно-временной (выполняемой с учётом значений в соседних узлах регулярной сетки) интерполяции, что также может вносить искажения в результирующие оценки.

РЕЗУЛЬТАТЫ ИССЛЕДОВАНИЯ И ИХ ОБСУЖДЕНИЕ

Типизация методов анализа графиков годового хода вегетационных индексов в целях выявления характерных точек, маркирующих смену вегетационных сезонов, может быть выполнена следующим образом:

- методы, основанные на анализе взаимного положения линейных отрезков графика вегетационного индекса;
- методы, предполагающие сглаживание графика вегетационного индекса путём осреднения значений с последующим выявлением характерных точек графика (перегибов, экстремумов, пересечений заданного порога);
- методы, основанные на аппроксимации графика вегетационного индекса полиномами с последующим выявлением характерных точек графика.

Первая группа методов находит применение в случае, когда временное разрешение спутниковой съёмки, на основе данных которой построены графики годового хода

вегетационного индекса, оказывается достаточно низким (в частности, составляет несколько суток). Характерным примером в данном случае являются графики годового хода NDWI, использованные авторами настоящего исследования ранее. Ранее выполненные исследования проводились на 4 тестовых участках, располагавшихся на территории Республики Коми, в Европейской части РФ; при этом использовались данные за 2000–2015 годы [Panidi, Tsepelev, 2017; Паниди и др. 2018].

На рисунке 1 приведён пример такого графика, построенного с шагом 8 суток (дней). Подобные графики вегетационных индексов характеризуются тем, что при наличии сравнительного короткого ряда значений вегетационного индекса, форма ломаной может быть осложнена (искажена) наличием двойных экстремумов и ложных (?) провалов, а также отсутствием выраженных перегибов. Границы полного вегетационного сезона (весна, лето, осень) по такому графику определяются путём поиска двух абсолютных экстремумов, весеннего и осеннего, а границы летнего сезона, в свою очередь, выделяются как границы «летнего плато» на графике. Последнее, впрочем, может быть выражено не ярко, когда переходы весна-лето и лето-осень не представлены на графике перегибами и график (часть графика) полного вегетационного сезона по форме схож с параболой. В связи с подобной особенностью NDWI в выполненных ранее исследованиях авторы выделяли границы летнего сезона с помощью линейного тренда для графика (части графика) полного вегетационного сезона, который позволяет отделить весеннюю и осеннюю части графика, характеризующиеся сравнительно большим градиентом и находящиеся под линией тренда, и летнюю часть, более пологую и находящуюся над линией тренда.

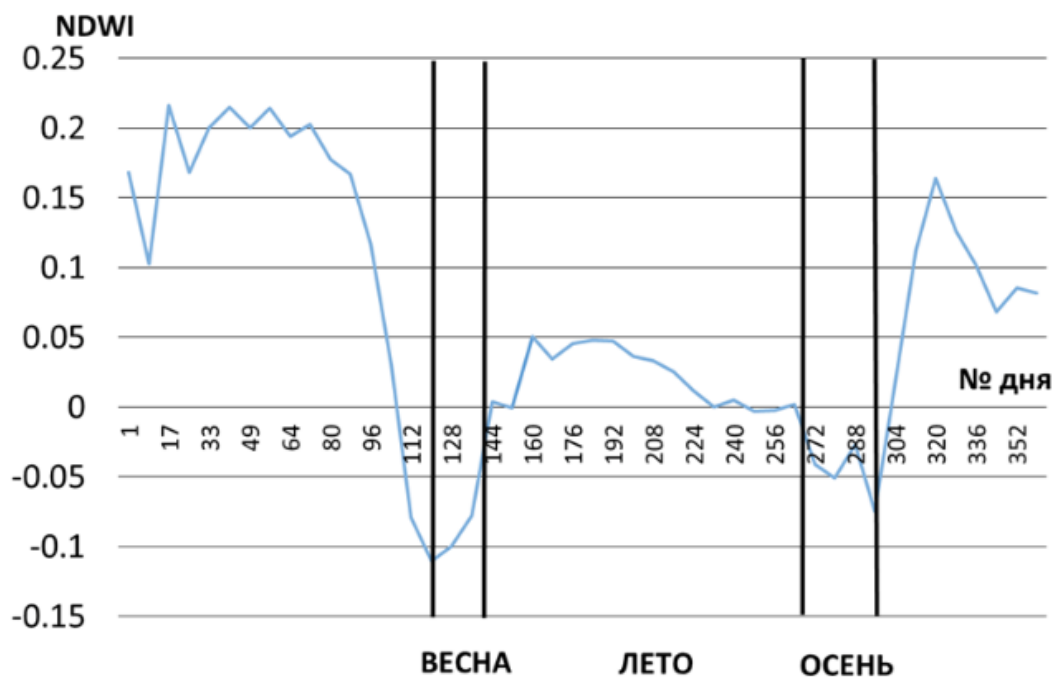


Рис. 1. График годового хода NDWI.

Значения осреднены по 8 дней;
вертикальными линиями показаны границы вегетационных сезонов,
определённые по данному графику

Fig. 1. Annual graph of the NDWI.

Values are averaged by 8 days;
vertical lines show the boundaries of the growing seasons
determined by this graph

Примером анализа взаимного положения отрезков графика может служить поиск положения весеннего и осеннего минимумов графика, который подразумевает, на первом этапе, поиск всех локальных минимумов (ситуаций, когда левый из двух соседних отрезков отражает рост значения индекса, а правый – убывание), с последующим поиском двух абсолютных минимумов на втором этапе.

Методы, предусматривающие сглаживание графика вегетационного индекса, способны найти применение в случаях, когда временной ряд имеет более высокую дискретность (период наблюдений более короток), например, 1 сутки. При этом график становится существенно более зашумлённым, проявляется большее число локальных экстремумов, как отрицательных, так и положительных. В подобной ситуации, по аналогии с анализом графиков годового хода температуры приземного воздуха [Скрынник, Скрынник, 2009; Паниди и др., 2018], может быть применено межгодовое осреднение значений индекса с использованием метода скользящего (во времени) окна (что позволит выполнять оценку климатической нормы параметров вегетационных сезонов), либо внутригодовое осреднение с использованием метода скользящей средней. Сам график при этом остаётся ломаной и дальнейший его анализ может быть выполнен путём оценки взаимного положения его линейных отрезков.

Методы, предполагающие аппроксимацию графика полиномами, кусочную или с использованием скользящего окна [Миклашевич, Барталёв, 2016], также могут быть применены в случае высокой временной дискретности ряда значений вегетационного индекса. По сравнению с методами, входящими в предыдущую группу, они подразумевают более высокие затраты вычислительных ресурсов, однако в противовес им позволяют формировать (аппроксимировать) экстремумы при неполноте или высокой зашумлённости ряда.

ВЫВОДЫ

Исследования, выполненные авторами настоящей статьи ранее, а также обзор работ других авторов, позволяют предложить типизацию методов анализа графиков годового хода вегетационных индексов (а в перспективе, вероятно, и других параметров растительного покрова), применяемых в целях выявления характерных точек, маркирующих границы вегетационных сезонов. Подобная типизация может быть использована в качестве основы для дальнейшей разработки комплексной методики анализа графиков годового хода параметров растительного покрова при определении временных границ вегетационных сезонов.

Настоящее исследование требует дальнейшей проработки с целью выявления ограничений каждого из возможных методов анализа графиков, которое неосуществимо без накопления достаточной статистики результатов анализа временных рядов различной протяжённости сформированных для разных природных зон (типов растительного покрова) и растительных сообществ.

БЛАГОДАРНОСТИ

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

Данные MOD09A1 V006 получены из 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 partially 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., Лупян 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. *Миклашевич Т.С., Барталёв С.А.* Метод определения фенологических характеристик растительного покрова на основе временных рядов спутниковых данных. Современные проблемы дистанционного зондирования Земли из космоса, 2016. Т. 13. № 1. С. 9–24. DOI:10.21046/2070-7401-2016-13-1-9-24.
3. *Паниди Е.А., Рыкин И.С., Цепелев В.Ю.* О проблеме определения временных границ вегетационных сезонов по данным наземных наблюдений и дистанционного зондирования. ИнтерКарто. ИнтерГИС. Материалы Междунар. конф. Петрозаводск: КарНЦ РАН, 2018. Т. 24. Ч. 2. С. 129–140. DOI:10.24057/2414-9179-2018-2-24-129-140.
4. *Педь Д.А.* Об определении дат устойчивого перехода температуры воздуха через определённые значения. Метеорология и гидрология, 1951. № 10. С. 38–39.
5. *Семёнова И.Г.* Синоптичні та кліматичні умови формування посушливих явищ в Україні. Дисертація на здобуття наукового ступеня доктора географічних наук. Одеса, 2015. 296 с.
6. *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.
7. *Bobkov A., Panidi E., Torloпова 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. *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.
11. *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.

REFERENCES

1. *Bobkov A., Panidi E., Torloпова 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. *Medvedeva M.A., Bartalyov 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. *Modern problems of remote sensing of the Earth from space*, 2008. V. 5. Iss. 2. P. 313–321 (in Russian).
 5. *Miklashevich T.S., Bartalyov S.A.* Method for estimating vegetation cover phenological characteristics from satellite data time series. *Modern problems of remote sensing of the Earth from space*, 2011. V. 8. No 4. P. 285–302. DOI: 10.21046/2070-7401-2016-13-1-9-24 (in Russian).
 6. *Panidi E.A., Rykin I.S., Tsepelev V.Yu.* Towards the issue of allocation of the time frames for growing seasons using ground observations and remote sensing data. *InterCarto. InterGIS. Proceedings of the International conference. Petrozavodsk: KarSC of RAS*, 2018. V. 24. Part 2. P. 129–140. DOI: 10.24057/2414-9179-2018-2-24-129-140 (in Russian, abs English).
 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/isprs-archives-XLII-3-W2-179-2017.
 8. *Ped' D.A.* About determination of dates of steady air temperature transition through certain values. *Meteorology and Hydrology*, 1951. No 10. P. 38–39 (in Russian).
 9. *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.
 10. *Semyonova I.G.* Synoptic and climatic conditions of formation of arid phenomena in Ukraine. Dissertation for the degree of Doctor of geographical sciences. Odessa, 2015. 296 p. (in Ukrainian).
 11. *Skrynnik O.Ya., Skrynnik O.A.* Climatological method for determining of the date of average daily air temperature steady transition through a given threshold. *Meteorology and Hydrology*, 2009. No 10. P. 90–99 (in Russian).
-