

значениях среднеквадратической ошибки (RMSE = 0,98-0,92 балла для сосняка, RMSE = 0,53-0,54 балла для черноольшаника).

**Заключение.** Таким образом, наибольшие значения коэффициента детерминации соответствуют параметрам сосновых лесов. Для черноольховых лесов относительно высокий коэффициент детерминации характерен для показателя сложности морфоструктуры полога. Наиболее информативными переменными для регрессионных моделей являются минимальные и максимальные пороговые значения. В целом, более высокая теснота связи между биометрическими характеристиками древостоев (особенно лиственных) и параметрами сегментации отмечена для летнего изображения.

Работа выполнена в рамках проекта РФФИ № 17-05-01129 «Оценка биометрических и морфоструктурных параметров лесных фитоценозов на основе детальной аэрокосмической съемки»

### **Библиографические ссылки**

1. Ehlers M., Gähler M., Janowsky R. Automated analysis of ultra high-resolution remote sensing data for biotope type mapping: new possibilities and challenges. ISPRS Journal of Photogrammetry and Remote Sensing. 2003. Т. 57. №. 5–6. С. 315-326.
2. Mora B., Wulder M., White J. Identifying leading species using tree crown metrics derived from very high spatial resolution imagery in a boreal forest environment. Can. J. Remote Sensing, 2010. Vol. 36. No. 4. P. 332–344
3. Жирин В.М., Князева С.В., Эйдлина С.П. Оценка биометрических параметров насаждений по изображениям межкоронового пространства на космических снимках сверхвысокого разрешения. Лесоведение. 2018. № 3. С. 163–177
4. Чебакова И. В. Национальные парки России. М.: Изд-во Центра охраны дикой природы. 1996. 198 с.
5. Жирин В. М., Князева С. В., Эйдлина С. П. Оценка влияния морфологии древесного полога и рельефа на спектральные характеристики лесов по данным Landsat. Исследование Земли из космоса. 2016. №. 5. С. 10–20.

УДК 528.88

## **ОПРЕДЕЛЕНИЕ ГРАНИЦ И ПРОДОЛЖИТЕЛЬНОСТИ ВЕГЕТАЦИОННЫХ СЕЗОНОВ ПО ДАННЫМ РЯДОВ СПУТНИКОВЫХ СЪЕМОК С ВЫСОКИМ ВРЕМЕННЫМ РАЗРЕШЕНИЕМ – ПРИМЕНЕНИЕ ОБЛАЧНЫХ ВЫЧИСЛЕНИЙ**

И. С. Рыкин<sup>1)</sup>, Е. А. Паниди<sup>2)</sup>

<sup>1)</sup> Санкт-Петербургский государственный университет, г. Санкт-Петербург, Россия, ivan.rykin94@gmail.com, st059068@student.spbu.ru

<sup>2)</sup> Санкт-Петербургский государственный университет, г. Санкт-Петербург, Россия, panidi@ya.ru, e.panidi@spbu.ru

Освещены экспериментальные исследования, связанные с аналитической обработкой многолетних рядов данных спутниковой съемки MODIS, имеющих временное разрешение в один день, с использованием платформы облачных вычислений Google Earth Engine. На примере территории республики Коми (Россия), выполнены построение рядов

карт, отражающих пространственное распределение нормализованного разностного водного индекса (NDWI) и вычисление рядов годового хода индекса на контрольных точках (в окрестности метеорологических станций) в целях косвенного определения дат смены вегетационных сезонов. Выявлено, что получаемые ряды годового индекса характеризуются зашумлённостью и наличием значительного числа разрывов (неполнотой данных).

Ключевые слова: спутниковое дистанционное зондирование MODIS; NDWI; вегетационные сезоны; изменения климата.

**Введение.** Изменения климата являют собой крайне сложный процесс, подверженный влиянию множества факторов и характеризующийся наличием региональной дифференциации. Традиционно, мониторинг основных параметров климата ведётся в пунктах наземной наблюдательной сети, которая в ряде случаев (в частности в северных регионах России) оказывается весьма разреженной, что затрудняет выявление и мониторинг региональных особенностей изменения климата. Решить данную проблему возможно путём привлечения данных спутниковых съёмок, однако при этом необходимо учитывать, что большинство параметров климата (в том числе, приземная температура и влажность воздуха) при использовании дистанционных методов могут быть оценены лишь косвенно, путём выбора и мониторинга подходящих индикаторов. Таким индикатором может являться растительность, в частности в более ранних исследованиях и публикациях авторов настоящей статьи [1, 2] и в публикациях ряда других авторов [3, 4] рассматривается и обосновывается возможность применения нормализованного разностного водного индекса (Normalized Difference Water Index – NDWI), определяемого на основе спутниковых данных, для косвенного определения граничных дат вегетационных сезонов и мониторинга их динамики во времени и пространстве. Ранее авторами были проведены исследования, связанные с изучением возможностей определения указанных дат с использованием восьмидневных композитов спутниковой съёмки MODIS. Такой подход позволяет существенно повысить пространственное разрешение наблюдений, но в связи с тем, что исходные данные осреднены по восемь дней, обладает сравнительно низким временным разрешением. В настоящее время исследования авторов направлены на изучение возможностей и путей повышения временного разрешения при выполнении косвенной оценки и картографирования пространственно-временного распределения и динамики граничных дат, и продолжительности вегетационных сезонов с использованием NDWI.

**Основная часть.** Под вегетационными сезонами в настоящем исследовании понимаются периоды, в которые приземная температура воздуха превышает  $+5^{\circ}\text{C}$  (соответственно, весной и осенью) и  $+10^{\circ}\text{C}$  (летом) [5]. По формуле предложенной Gao [6], NDWI вычисляется на основе каналов спутниковой съёмки, регистрирующих спектральные яркости в ближнем инфракрасном (NIR) и коротковолновом инфракрасном (SWIR) диапазонах спектра. Началу и окончанию полного вегетационного сезона соответствуют весенний и осенний минимумы на графике годового хода индекса, летнему сезону – «плато» на графике в летний период (Рис. 1).

Исследование выполняется на территории республики Коми (север европейской России). Регион характеризуется разнообразием климатообразующих факторов и располагается в нескольких природных зонах, при этом является малонаселённым. Для оценки точности косвенных определений дат смены вегетационных сезонов в исследовании используются ряды среднесуточных значений приземной температуры воздуха, регистрируемой на метеорологических станциях Росгидромета. Ряды данных для 10 метеорологических станций, расположенных в республике, получены из базы метеорологических данных Аисори.

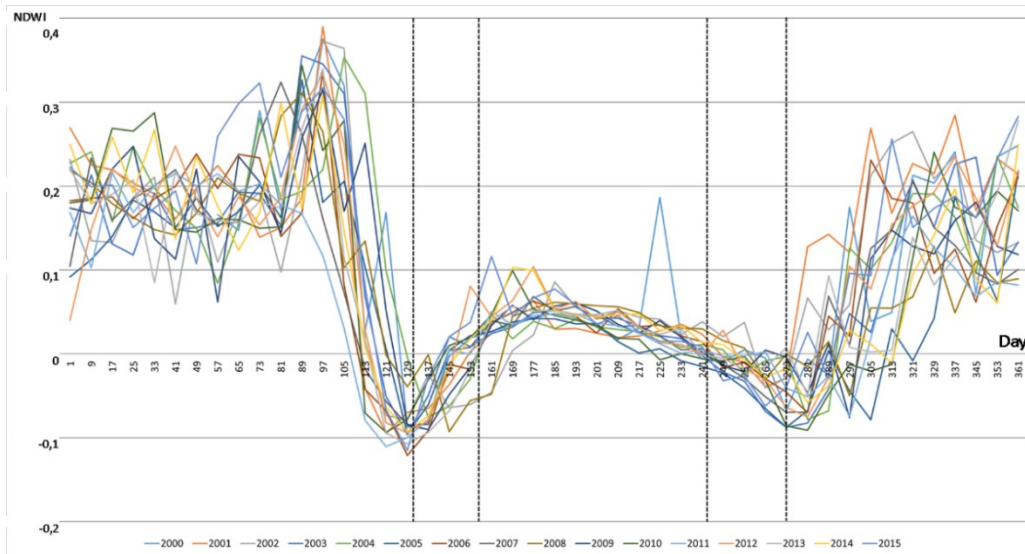


Рис. 1. Пример графиков годового хода NDWI для окрестности метеорологической станции Сыктывкар (республика Коми, Россия) с 2000 по 2015 годы, вертикальные линии разграничивают усреднённые вегетационные сезоны

Для вычисления NDWI в исследовании использованы данные спутниковой съёмки MODIS. Ряд данных формируется начиная с 2000 года. Использован продукт MOD09GA в состав которого входят данные в семи спектральных каналах, прошедшие атмосферную коррекцию. Пространственное разрешение составляет 500 метров на пиксель, временное разрешение – один день (одни сутки).

Подобного рода данные, не попадая под классическое понимание больших данных, оказываются весьма объёмными и сложными как для загрузки, так и для обработки на настольном компьютере. В настоящем исследовании для обработки данных использована публичная облачная платформа Google Earth Engine (<https://code.earthengine.google.com>), предоставляющая доступ к онлайн-каталогу данных спутниковых съёмок и инструментов для создания и выполнения программного кода, позволяющего выполнять аналитические вычисления на основе данных, представленных в каталоге.

Обработка данных включила извлечение из каталога данных MOD09GA за 2000–2019 годы для территории Коми (обрезку по административной границе). Для каждого суточного набора данных была сформирована маска об-

лачности [7], которая была использована для исключения из анализа территорий, закрытых облаками. Были построены десятикилометровые буферные зоны вокруг метеорологических станций (Рис. 2). В их пределах, выполнялось осреднение суточных значений NDWI при построении графиков годового хода индекса для станций.

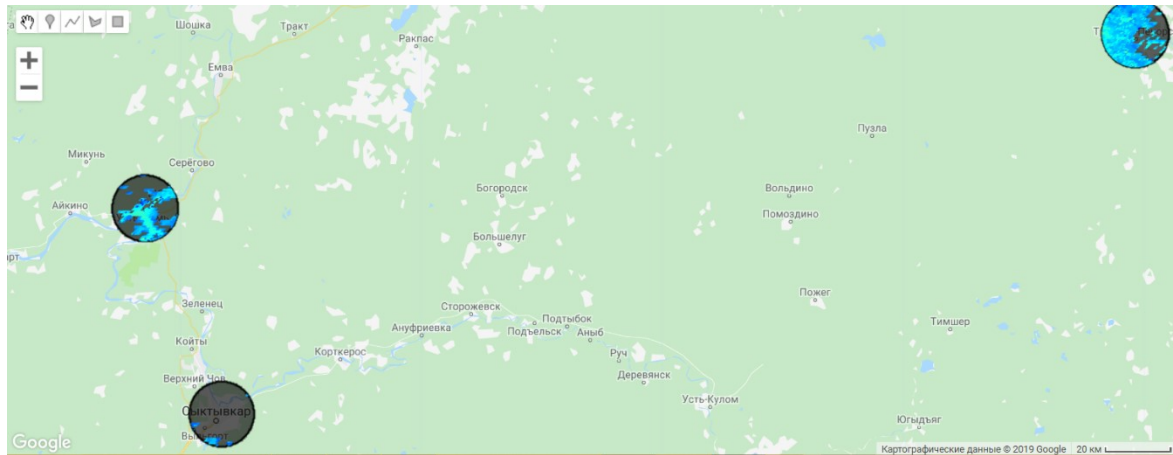


Рис. 2. Пример карты пространственного распределения NDWI в окрестностях метеорологических станций, с наложением масок десятикилометровых буферных зон метеорологических станций, облачности и растительности

Сформированные графики годового хода индекса используются для определения граничных дат вегетационных сезонов и анализа точности определения, путём сопоставления с рядами значений приземной температуры воздуха, наблюденной на станциях. Данный этап исследования в момент написания статьи является активным и не завершён.

**Заключение.** В результате проделанной работы выявлено, что ряды NDWI с временным разрешением в один день могут быть рассчитаны с использованием платформы Google Earth Engine. Такой подход является эффективным и существенно сокращает трудовые и временные затраты на вычисления. Вместе с тем, получаемые таким образом графики годового хода NDWI характеризуются значительной зашумлённостью и наличием большого числа разрывов, вызванных в частности большим числом облачных дней. Таким образом, в дальнейшем должны быть исследованы возможности фильтрации и интерполяции получаемых данных.

### Библиографические ссылки

1. Паниди Е. А., Рыкин И. С., Цепелев В. Ю. О проблеме определения временных границ вегетационных сезонов по данным наземных наблюдений и дистанционного зондирования. Материалы Международной конференции «ИнтерКарто/ИнтерГИС», том 24, часть 2, 2018. с. 129–140 doi:10.24057/2414-9179-2018-2-24-129-140
2. Panidi E., Rykin I., Nico G., Tsepelev V. Toward Satellite-Based Estimation of Growing Season Framing Dates in Conditions of Unstable Weather. *Advances in Remote Sensing and Geo Informatics Applications. Advances in Science, Technology & Innovation*, Springer, Cham, 2019. с. 131–133 doi:10.1007/978-3-030-01440-7\_31

3. 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*, Vol. 97(1), 2005. pp. 26-38. doi:10.1016/j.rse.2005.03.011
4. 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*, Vol. XXXVIII, Part 1, 2010. 5 p.
5. Справочник по климату СССР, выпуск 1, Архангельская и Вологодская области, Карельская и Коми АССР, часть 2, Темпера воздуха и почвы. Л.: Гидрометиздат, 1968. 360 с.
6. Gao B.C. NDWI A Normalized Difference Water Index for Remote Sensing of Vegetation Liquid Water From Space. *Remote Sensing of Environment*, Vol. 58(3), 1996. pp. 257–266
7. Eric F. Vermote, MODIS Surface Reflectance User's Guide, Version 1.3., 2011. 40 p.

УДК 528.854

## ИСПОЛЬЗОВАНИЕ ОТКРЫТОГО ПРОГРАММНОГО ОБЕСПЕЧЕНИЯ ПРИ МОНИТОРИНГЕ ЛЕСНОЙ РАСТИТЕЛЬНОСТИ ПО СПУТНИКОВЫМ ДАННЫМ SENTINEL 2

А. А. Топаз <sup>1)</sup>, А. И. Волосюк <sup>2)</sup>

<sup>1)</sup>Белорусский государственный университет, г. Минск, Беларусь, topaz\_antonina@mail.ru

<sup>2)</sup>Белорусский государственный университет, г. Минск, Беларусь, froloi@yandex.ru

В статье представлены результаты экспериментальных исследований по использованию открытого программного обеспечения для обработки данных дистанционного зондирования Земли. Выполнен расчет спектральных индексов и анализ полученных цветокодированных изображений. Сделаны выводы о возможности использования спутниковых данных Sentinel 2, а также языка программирования Python и библиотеки EO-learn для создания систем мониторинга лесной растительности.

Ключевые слова: дистанционное зондирование; открытое программное обеспечение; язык программирования Python; библиотека EO-learn; мониторинг лесной растительности.

**Введение.** На современном этапе для устойчивого эффективного управления лесами органам лесного и лесопаркового хозяйства необходима постоянно поступающая актуальная и объективная информация о состоянии и динамике лесных экосистем.

Наличие открытых данных дистанционного зондирования Земли (ДЗЗ) в рамках программы Copernicus (ESA) представляет собой беспрецедентный ресурс при решении многих задач ДЗЗ, среди которых можно выделить и мониторинг состояния лесной растительности.

Главная цель научного исследования заключалась в выполнении обработки с использованием открытого программного обеспечения и языка программирования Python спутниковых данных Sentinel 2 A-B, а также оценке возможности их применения для мониторинга лесной растительности.