

УДК 911.5+504.54

UDC 911.5+504.54

ДИСТАНЦИОННЫЕ ИНДИКАТОРЫ ДЕГРАДАЦИИ ЛЕСНЫХ ГЕОСИСТЕМ ЮГО-ВОСТОКА БЕЛАРУСИ

DISTANCE INDICATORS OF DEGRADING FOREST GEOSYSTEMS IN THE SOUTH-EAST OF BELARUS

А. П. Гусев,

кандидат геолого-минералогических наук, декан геолого-географического факультета ГГУ им. Ф. Скорины

A. Gusev,

PhD in Geology and Mineralogy, Dean of the Faculty of Geology and Geography, GSU named after F. Skoryna

Поступила в редакцию 27.03.19.

Received on 27.03.19.

Изучены возможности данных космической съемки спутников Sentinel-2 для оценки деградации лесных геосистем в условиях ландшафтов Беларуси. По многозональным снимкам Sentinel-2 рассчитаны вегетационные индексы на участках, где проведена оценка древостоя. Выполнена оценка корреляционной связи между состоянием древостоя (L_n) и вегетационными индексами (NDVI, GNDVI, NBR, SWVI). Значения коэффициентов корреляции Спирмена между L_n и вегетационными индексами составляют 0,549–0,664. Установлены диапазоны значений вегетационных индексов для категорий состояния древостоя. Для оценки предложен относительный показатель $dsVI$, рассчитываемый по сравнению с фоновыми (ненарушенными) лесными геосистемами.

Ключевые слова: дистанционное зондирование, Sentinel-2, вегетационные индексы, индекс состояния древостоя, лесные геосистемы.

The possibilities of satellite imagery data from Sentinel-2 satellites for assessing the degradation of forest geosystems in the landscape of Belarus were studied. Using Sentinel-2 multi-zone images, vegetation indices were calculated in the areas where the forest stand was assessed. The correlation between the state of the stand (L_n) and vegetation indices (NDVI, GNDVI, NBR, SWVI) was estimated. Spearman's correlation coefficients between L_n and vegetation indices are 0.549–0.664. The ranges of values of vegetation indices for the categories of state of the stand are established. For estimation, a relative indicator $dsVI$ is calculated, which is calculated in comparison with the background (undisturbed) forest geosystems.

Keywords: distant probing, Sentinel-2, vegetation indices, forest stand status index, forest geosystems.

Введение. Физическими предпосылками использования дистанционного зондирования для оценки повреждения лесных геосистем являются изменения их отражательных способностей в видимом, ближнем и среднем инфракрасном диапазонах длин волн. Изменения отражательной способности лесных геосистем проявляются при пожелтении листвы и хвои, дефолиации, при усыхании и уменьшении сомкнутости древесных ярусов, то есть при деградации ведущего компонента – древесной растительности. В научной литературе приводятся данные об использовании различных вегетационных индексов для оценки и картографирования повреждения лесной растительности: пожарами, выбросами в атмосферу, вредителями [1, 2].

Наиболее изученный и широко используемый для оценки деградации геосистем вегетационный индекс – NDVI, вычисляемый по соотношению коэффициентов отражения в красном и ближнем инфракрасном диапазонах электромагнитного спектра (таблица 1). NDVI характеризуется высокой степенью корреляции с первичной продукцией и биомассой, поэтому может считаться инди-

катором биопродуктивности и связанной с ней устойчивости геосистем [1]. В неблагоприятных условиях образование хлорофилла в листьях деревьев замедляется, что обуславливает рост отражения в красной и падение в инфракрасной области спектра, что сказывается на величине NDVI [1, 2]. GNDVI рассматривается как индикатор концентрации хлорофилла в листьях и хвое, скорости фотосинтеза и стресса растений. При пожелтении и усыхании растёт отражение в красной и снижается в зелёной области спектра, в результате чего наблюдается падение значений GNDVI [3]. Повреждение растительности, прежде всего при пожарах, приводит к снижению содержания влаги, что обуславливает использование коротковолновых (Short Wave) индексов SWVI и NBR [2, 4]. Так, SWVI является индикатором стрессового состояния растительности и хорошо зарекомендовал себя для оценки усыхания и повреждения древесной растительности под влиянием различных факторов [2]. NBR широко используется для оценки повреждения лесов в разных природных зонах пожарами, при мониторинге пожаров [4].

Таблица 1 – Вегетационные индексы, используемые для индикации

| Вегетационный индекс | Формула расчета на основе каналов спутника Sentinel-2 | Биофизический смысл |
|--|---|--|
| NDVI (Normalized Difference Vegetation Index) | $(B08-B04)/(B08+B04)$ | Количественный показатель фотосинтетически активной биомассы [1] |
| GNDVI (Green Normalized Difference Vegetation Index) | $(B08-B03)/(B08+B03)$ | Показатель содержания хлорофилла [2] |
| NBR (Normalized Burn Ratio) | $(B08-B12)/(B08+B12)$ | Показатель пирогенных повреждений растительности [4] |
| SWVI (Short Wave Vegetation Index) | $(B08-B11)/(B08+B11)$ | Показатель содержания влаги и хлорофилла в зеленых фракциях растений [2] |

В то же время использование вегетационных индексов для оценки антропогенной деградации геосистем затрудняется сильной пространственно-временной изменчивостью спектрально-отражательных свойств земной поверхности, обусловленной их зависимостью от метеорологических и климатических факторов, рельефа, атмосферных аэрозолей, разрешения спутниковых снимков и т. д. Корреляционные зависимости между вегетационными индексами и экологическими показателями в разных природных зонах и регионах могут существенно отличаться [1]. В связи с этим необходимы региональные исследования и количественная оценка взаимосвязей между спектрально-отражательными свойствами, выраженными в виде вегетационных индексов, и биофизическими показателями геосистем.

Цель работы – изучение возможностей вегетационных индексов, полученных на основе космической съемки спутников Sentinel-2, для оценки деградации лесных геосистем в условиях ландшафтов Беларуси.

Решаемые задачи: полевые работы на ключевых участках по оценке жизненного состояния древостоя в лесных геосистемах юго-востока Беларуси; определение спектрально-отражательных свойств ключевых участков по данным космической съемки спутников Sentinel-2; оценка связи между показателем состояния древостоя и вегетационными индексами, получаемыми на основе данных космической съемки; разработка методики оценки деградации лесных геосистем по вегетационным индексам.

Методические подходы. Район исследований находится на юго-востоке Беларуси. Объектом исследования являлись лесные геосистемы, расположенные в окрестностях города Гомеля. Климат – умеренно-континентальный. Преобладающие природные ланд-

шафты – аллювиальные террасированные, водно-ледниковые и моренно-зандровые. Природный растительный покров – сосновые, широколиственно-сосновые, широколиственные и мелколиственные леса. Почвы – дерново-подзолистые песчаные и супесчаные.

В работе использованы результаты космической съемки спутников Sentinel-2. Программа Copernicus Европейского космического агентства (ESA) включает в себя два спутника, летающих на солнечно-синхронной орбите и предназначенных для систематической мультиспектральной съемки. Сенсор Sentinel-2 ведет съемку в 13 каналах, охватывающих диапазон от 433 до 2280 нанометров. Пространственное разрешение съемки в зависимости от канала – 10–60 м. В частности, каналы B02 (голубой), B03 (зеленый), B04 (красный), B08 (ближний инфракрасный) имеют разрешение 10 м; каналы B11 и B12 (коротковолновые) – 20 м. Ширина полосы захвата – 290 км. Периодичность съемки – 2–3 дня. Sentinel-2A выведен на орбиту летом 2015 г., Sentinel-2B – в марте 2017 г. Данные спутниковой съемки находятся в свободном доступе на Copernicus Open Access Hub (<https://scihub.copernicus.eu/dhus/#/home>).

Для оценки деградации лесных геосистем применялись вегетационные индексы, характеристики которых приводятся в таблице 1. Вегетационные индексы рассчитывались по летним снимкам Sentinel-2 (20.06.2018 г., 11.08.2018 г., 26.08.2018 г.), по которым для каждого ключевого участка вычислялись среднее значение, медианное значение, стандартное отклонение (по 25 пикселям снимка). С целью компенсации влияния метеорологических условий на момент съемки для анализа использованы усредненные значения по трем снимкам (таблица 2).

Таблица 2 – Перечень снимков, используемых для анализа

| Спутник, сенсор | Дата съемки | Уровень обработки | Пространственное разрешение, м |
|------------------|---------------|---|--------------------------------|
| Sentinel-2A, MSI | 26.08.2018 г. | Радиометрическая и геометрическая коррекция | 10–60 |
| Sentinel-2B, MSI | 11.08.2018 г. | | 10–60 |
| Sentinel-2A, MSI | 20.06.2018 г. | | 10–60 |

На ключевых участках проводилась глазомерная оценка жизненного состояния древостоя (не менее 20 деревьев), определялся тип леса, сомкнутость, средняя высота и возраст древостоя, состав подроста и подлеска, проективное покрытие и доминанты напочвенного покрова. Координаты ключевых участков устанавливались по GPS. Полевые работы проводились в июле – августе 2018 г.

Оценка состояния древостоя на ключевом участке выполнялась путем расчета индекса состояния по формуле: $L_n = (100 \cdot n_1 + 70 \cdot n_2 + 40 \cdot n_3 + 5 \cdot n_4) / N$, где n_1 – количество здоровых деревьев; n_2 – количество ослабленных деревьев; n_3 – количество сильно ослабленных деревьев; n_4 – количество усыхающих деревьев; N – все деревья (включая сухостой) [5].

Градации индекса жизненного состояния L_n даны по В. А. Алексею [6]: 100–80 – здоровый древостой; 79–50 – поврежденный (ослабленный) древостой; 49–20 – сильноповрежденный (сильноослабленный); менее 19 – разрушенный.

Результаты и их обсуждение. Из литературных источников известно, что величина вегетационных индексов зависит в значительной степени от особенностей растительного покрова. Наибольшие значения характерны для лесов, наименьшие – для участков, лишенных растительности [1]. Кроме того, спектрально-отражательные свойства лесов зависят от их породного состава, от возраста древостоя [7]. Влияние этих факторов является «шумом» при изучении изме-

нений спектрально-отражательных свойств лесного покрова, вызванных антропогенными нарушениями. Чтобы компенсировать это влияние, ключевые участки располагались только в лесных геосистемах, представленных сосновыми и широколиственно-сосновыми лесами, имеющих возраст верхнего древесного яруса не менее 50 лет. Преобладающие типы леса – сосняк мшистый, сосняк орляковый, сосняк кисличный. Территориально ключевые участки находились в пределах Новобелицкого, Ченковского, Кореневского, Зябровского лесничеств Кореневской экспериментальной лесной базы, Макеевского и Приборского лесничеств Гомельского опытного лесхоза.

Антропогенные нарушения изучаемых лесных геосистем вызваны воздействием рекреации, пожаров и химического загрязнения атмосферы (в зоне влияния Гомельского химического завода и ТЭЦ-2). Кроме лесных геосистем 10 ключевых участков было расположено на свежих вырубках и гарях (здесь древостой отсутствует, и соответственно его жизненное состояние не оценивалось).

Все ключевые участки по результатам оценки жизненного состояния древостоя были разделены на следующие группы: здоровый древостой ($L_n > 80$); поврежденный древостой (79–50); сильноповрежденный древостой ($L_n < 49$); гари и вырубки (возраст до 5 лет). Для каждой группы с помощью модуля зональной статистики программы QGIS были рассчитаны характеристики вегетационных индексов (таблица 3).

Таблица 3 – Вегетационные индексы как индикаторы жизненного состояния древостоя

| Вегетационный индекс | Индекс состояния древостоя | | | Гари и вырубки (n = 10) | |
|----------------------|----------------------------|----------------|---------------|-------------------------|--------|
| | > 80 (n = 20)* | 79–50 (n = 24) | < 49 (n = 16) | | |
| NDVI | Среднее | 0,784 | 0,754 | 0,660 | 0,507 |
| | Медиана | 0,789 | 0,772 | 0,673 | 0,513 |
| | Стандартное отклонение | 0,035 | 0,063 | 0,066 | 0,091 |
| GDVI | Среднее | 0,749 | 0,726 | 0,671 | 0,586 |
| | Медиана | 0,748 | 0,733 | 0,672 | 0,587 |
| | Стандартное отклонение | 0,028 | 0,038 | 0,034 | 0,048 |
| NBR | Среднее | 0,565 | 0,520 | 0,378 | 0,157 |
| | Медиана | 0,575 | 0,547 | 0,387 | 0,164 |
| | Стандартное отклонение | 0,039 | 0,079 | 0,093 | 0,097 |
| SWVI | Среднее | 0,267 | 0,233 | 0,115 | -0,074 |
| | Максимум | 0,305 | 0,328 | 0,302 | 0,038 |
| | Стандартное отклонение | 0,035 | 0,061 | 0,085 | 0,073 |

Примечание: * – число ключевых участков.

Различия значений индексов выделенных групп друг от друга оценивали по критерию Манна – Уитни. Индексы первой и второй группы достоверно отличаются с уровнем значимости $p < 0,05$, все остальные – $p < 0,01$.

Видно, что имеет место снижение средних и медианных значений всех рассматриваемых индексов по градиенту нарушений лесных геосистем: от геосистем со здоровым древостоем до гарей и вырубок. Кроме того, по мере роста нарушений возрастает величина стандартного отклонения. Так, среднее значение NDVI для геосистем, имеющих здоровый древостой, составило 0,784, тогда как для геосистем с сильноповрежденным древостоем – 0,660, то есть в 1,19 раза меньше. Разница между средними значениями GDVI для здорового и сильноповрежденного древостоя составила 0,078 (разница по NDVI – 0,124). Различия в средних значениях для этих категорий древостоя по NBR и SWVI более значительны – 0,187 и 0,152 соответственно.

Геосистемы с древесным ярусом резко отличаются по всем вегетационным индексам от гарей и вырубок, то есть участков, где древостой отсутствует или очень сильно разрежен. Для NDVI гари и вырубки индицируются значениями менее 0,6. В зависимости от возраста гари или вырубки величина NDVI может колебаться в значительных пределах – от 0,6 до 0,4. Схожие закономерности прослеживаются для GDVI. Индекс SWVI на гарях и вырубках приобретает отрицательные значения. Этот показатель является надежным индикатором, по которому можно отличать лесные геосистемы ($SWVI > 0$) от нелесных ($SWVI < 0$).

Выполнен корреляционный анализ, который установил, что между вегетационными индексами и жизненным состоянием древо-

стоя имеется достоверная связь. Наиболее высокий коэффициент корреляции Спирмена между NDVI и L_n – 0,664, наименьший между SWVI и L_n – 0,549 (таблица 4). Кроме того, вегетационные индексы коррелируют между собой. Наиболее тесная связь между NDVI и GNDVI (коэффициент ранговой корреляции Спирмена составил 0,96), между NDVI и NBR (0,94), между NBR и SWVI (0,96). Для других сочетаний значения коэффициентов корреляции составляют 0,77–0,87.

Взаимосвязь между вегетационными индексами и индексом жизненного состояния древостоя описывается уравнениями линейной регрессии, приведенными в таблице 4. Можно предположить, что в условиях ландшафтов юго-востока Беларуси эти уравнения могут использоваться для экспресс-оценки жизненного состояния древостоя по материалам дистанционного зондирования.

Спектрально-отражательные свойства лесного покрова претерпевают значительные изменения как в течение вегетационного периода, так и между разными годами [1], что делает применение абсолютных значений спектральных индексов практически невозможным. Так, например, с апреля по октябрь в лесных геосистемах, представленных сосновыми лесами, NDVI изменяет от 0,60 до 0,80, NBR от 0,30 до 0,60, SWVI – от 0,05 до 0,30. В лиственных лесах колебания более значительны: NDVI – 0,40 до 0,90, NBR – от 0,05 до 0,70, SWVI – от – 0,15 до 0,40. Минимальные значения приходятся на апрель, максимальные – на июль – август. Кроме того, показатели, полученные с помощью разных сенсоров (MSI – Sentinel-2, OLI – Landsat 8, TM – Landsat 4–5, Landsat 7 – ETM+), могут отличаться.

Таблица 4 – Корреляционная связь индекса жизненного состояния древостоя (L_n) с вегетационными индексами

| Вегетационный индекс | Коэффициент корреляции Спирмена | Уравнение линейной регрессии |
|----------------------|---------------------------------|-------------------------------------|
| NDVI | 0,664, $p < 0,001$ | $L_n = 163,75 \cdot NDVI - 57,43$ |
| GNDVI | 0,662, $p < 0,001$ | $L_n = 279,86 \cdot GNDVI - 137,71$ |
| NBR | 0,651, $p < 0,001$ | $L_n = 124,98 \cdot NBR + 1,39$ |
| SWVI | 0,549, $p < 0,001$ | $L_n = 139,67 \cdot SWVI + 34,08$ |

Поэтому предлагается использовать относительные показатели: $dsVI = VI_0 - VI_1$, где VI_0 – среднее значение вегетационного индекса для фоновой (ненарушенной) лесной геосистемы; VI_1 – среднее значение индекса для оцениваемой лесной геосистемы.

Рекомендованные градации относительных показателей ($dsNDVI$, $dsGNDVI$, $dsNBR$,

$dsSWVI$) приведены в таблице 5. Так, например, для геосистем с сильно поврежденным древесным ярусом значения NDVI снижены относительно фона на 0,08–0,18, GNDVI – на 0,05–0,11, NBR – на 0,10–0,28, SWVI – на 0,08–0,22. Относительный показатель может применяться при космическом мониторинге многолетней динамики лесных геосистем

с использованием серий снимков разных спутников – Landsat 4–5, Landsat 7, Landsat 8.

Таблица 5 – Оценка деградации лесных геосистем по вегетационным индексам

| Показатель | Состояние древостоя | | | Гари и выруб-ки |
|------------|---------------------|--------------|--------------------|-----------------|
| | Здоровый | Поврежденный | Сильноповрежденный | |
| dsNDVI | 0,00–0,01 | 0,01–0,07 | 0,08–0,18 | > 0,19 |
| dsGNDVI | 0,00–0,01 | 0,01–0,04 | 0,05–0,11 | > 0,12 |
| dsNBR | 0,00–0,01 | 0,01–0,09 | 0,10–0,28 | > 0,29 |
| dsSWVI | 0,00–0,01 | 0,02–0,07 | 0,08–0,22 | > 0,23 |

Согласно проведенному анализу научной литературы и полученным данным, оценка деградации лесных геосистем по вегетационным индексам должна осуществляться при соблюдении следующих условий:

использоваться должны безоблачные снимки, сделанные в июле – августе (для устранения влияния облачности и фенологии); снимки должны пройти геометрическую и радиометрическую коррекцию;

расчеты вегетационных индексов выполняются по маске лесных геосистем, предва-

рительно разработанной в ходе дешифрирования снимков Landsat или Sentinel с привлечением данных Google Earth;

для оценки применяются относительные показатели dsVI.

Заключение. Исходя из полученных результатов видно, что категориям жизненного состояния древостоя соответствуют определенные значения вегетационных индексов. При этом средние значения вегетационных индексов для трех выделенных категорий жизненного состояния достоверно отличаются по критерию Манна – Уитни. Для оценки состояния лесных геосистем в условиях Беларуси могут использоваться все четыре рассмотренных индекса (NDVI, GNDVI, NBR, SWVI). Для снижения влияния сезонных и межгодовых колебаний рекомендуется применять относительный показатель, который может быть получен сравнением измеряемых индексов с их фоновым значением. В качестве фонового значения принимается средняя величина соответствующего индекса для ненарушенной лесной геосистемы.

ЛИТЕРАТУРА

1. The use of the Normalized Difference Vegetation Index (NDVI) to assess land degradation at multiple scales: a review of the current status, future trends, and practical considerations / G. T. Yengoh [et al.]. – Lund: LUCSUS, 2014. – 80 p.
2. Ceccato, P. Detecting vegetation water content using reflectance in the optical domain / P. Ceccato [et al.] // Remote Sensing of Environment. – 2001. – Vol. 77. – P. 22–33.
3. Gitelson, A. Remote Sensing of Chlorophyll Concentration in Higher Plant Leaves / A. Gitelson, M. Merzlyak // Advances in Space Research. – 1998. – Vol. 22. – P. 689–692.
4. Miller, J. D. Calibration and Validation of Immediate Post-Fire Satellite-Derived Data to three severity metrics / J. D. Miller, B. Quayle // Fire Ecology. – 2015. – Vol. 11. – № 2. – P. 12–30.
5. Методические подходы к оценке и картографированию состояния и устойчивости к антропогенным нагрузкам насаждений городов / А. В. Пугачевский [и др.] // Природные ресурсы. – 2007. – № 3. – С. 33–44.
6. Алексеев, В. А. Диагностика жизненного состояния деревьев и древостоев / В. А. Алексеев // Лесоведение. – 1989. – № 4. – С. 51–57.
7. Терехин, Э. А. Исследование связи спектральными отражательными свойствами лесных насаждений Белгородской области и их лесотаксационными параметрами / Э. А. Терехин // Научные ведомости БелГУ. Серия естественные науки. – 2010. – № 21. – С. 157–167.

REFERENCES

1. The use of the Normalized Difference Vegetation Index (NDVI) to assess land degradation at multiple scales: a review of the current status, future trends, and practical considerations / G. T. Yengoh [et al.]. – Lund: LUCSUS, 2014. – 80 p.
2. Ceccato, P. Detecting vegetation water content using reflectance in the optical domain / P. Ceccato [et al.] // Remote Sensing of Environment. – 2001. – Vol. 77. – P. 22–33.
3. Gitelson, A. Remote Sensing of Chlorophyll Concentration in Higher Plant Leaves / A. Gitelson, M. Merzlyak // Advances in Space Research. – 1998. – Vol. 22. – P. 689–692.
4. Miller, J. D. Calibration and Validation of Immediate Post-Fire Satellite-Derived Data to three severity metrics / J. D. Miller, B. Quayle // Fire Ecology. – 2015. – Vol. 11. – № 2. – P. 12–30.
5. Pugachevskij, A. V. Metodicheskie podhody k ocenke i kartografirovaniyu sostoyaniya i ustojchivosti k antropogennym nagruzkami nasazhdenij gorodov / A. V. Pugachevskij [i dr.] // Prirodnye resursy. – 2007. – № 3. – S. 33–44.
6. Alekseev, V. A. Diagnostika zhiznennogo sostoyaniya derev'ev i drevostoev / V. A. Alekseev // Lesovedenie. – 1989. – № 4. – S. 51–57.
7. Terekhin, E. A. Issledovanie svyazi spektral'nymi otrazhatel'nymi svojstvami lesnyh nasazhdenij Belgorodskoj oblasti i ih lesotaksacionnymi parametrami / E. A. Terekhin // Nauchnye vedomosti BelGU. Seriya estestvennye nauki. – 2010. – № 21. – S. 157–167.