

*В. П. Ступин*¹✉

Применение индексных изображений при дистанционном картографическом мониторинге нарушенности лесов Приангарья

¹Иркутский национальный исследовательский технический университет,
г. Иркутск, Российская Федерация
e-mail: stupinigu@mail.ru

Аннотация. Рассмотрены факторы нарушенности лесов Приангарья и возможности выявления нарушений средствами SAGA GIS с использованием индексных изображений, полученных по снимкам Landsat 8, 9 и Sentinel 2. Приведены характеристики исходных материалов и возможности программного обеспечения их обработки. Показано, что снимки среднего разрешения оптимальны для создания индексных изображений. Проанализированы 13 индексов в интересах выявления, классификации, оценки, определения динамики и картографирования нарушений таежных лесов. Установлено, что вегетационные индексы позволяют выявлять участки, лишённые растительности и зоны с низкой степенью вегетации, анализировать и картографировать состояние растительного покрова на нарушенных землях, гарях, вырубках, карьерах, отвалах. Приведены количественные характеристики индексов разных типов таежных ландшафтов. Оценены возможности, достоинства и недостатки использования индексных изображений в интересах дистанционного картографического мониторинга состояния растительного покрова. Выяснено, что включение индексных изображений в состав исходной информации для кластеризации значительно повышает качество классификации без обучения. Отмечено, что индексы не отражают абсолютные количественные показатели и сильно зависят от условий съёмки. Однако, относительные показатели можно пересчитать в абсолютные и корректно интерпретировать на основе полевых натурных данных с привлечением экспертов.

Ключевые слова: Индексные изображения; индикация нарушенности лесов, возможности индексных изображений

*V. P. Stupin*¹✉

Comprehensive analysis of index images in monitoring the taiga forests of the Angara region

¹Irkutsk National Research Technical University, Irkutsk, Russian Federation
e-mail: stupinigu@mail.ru

Abstract. The factors of disturbance of the forests of the Angara region and the possibility of detecting violations using SAGA GIS using index images obtained from Landsat 8, 9 and Sentinel 2 images are considered. The characteristics of the source materials and the capabilities of the software for their processing are given. It is shown that medium-resolution images are optimal for creating index images. 13 indexes were analyzed in order to identify, classify, evaluate, determine the dynamics and map violations of taiga forests. It has been established that vegetation indexes make it possible to identify areas devoid of vegetation and areas with a low degree of vegetation, analyze and map the state of vegetation cover on disturbed lands, fires, cuttings, quarries, and landfills. Quantitative characteristics of indices of different types of taiga landscapes are given. The possibilities, advantages and disadvantages of using index images in the interests of remote cartographic monitoring of vegetation cover are evaluated. It was found that the inclusion of index images in the source information for clustering significantly improves the quality of classification

without training. It is noted that the indexes do not reflect absolute quantitative indicators and strongly depend on the shooting conditions. However, relative indicators can be converted to absolute ones and correctly interpreted based on field data with the involvement of experts.

Keywords: Index images; indication of forest disturbance, index image capabilities

Введение

Тажная территория Среднего Приангарья характеризуется высокой антропогенной нагрузкой на растительный покров. В таежной зоне осуществляется интенсивная лесозаготовка, нередко лесные пожары, ведется активная горнопромышленная и иная производственная деятельность [1]. Основными внешними проявлениями нарушенности таежных ландшафтов на исследуемой территории являются свежие, зарастающие и старые гари, вырубки на разной стадии восстановления, размываемые берега водохранилищ, горные карьеры и отвалы, автомобильные и железные дороги, объекты строительства.

Серьезность проблемы требует организации мониторинга на региональном уровне, а обширность территорий и высокая динамика изменений вызывает необходимость его реализации на основе данных дистанционного зондирования Земли (ДЗЗ) [2-8]. Этот подход в полной мере применим и к территории Среднего Приангарья [9-14]. Одним из эффективных инструментов такого мониторинга, является использование индексных изображений [15-17].

Методы и материалы

Индексные изображения, получаемые в результате обработки мультиспектральных снимков, позволяют извлечь неявную информацию о изобразившихся на снимках объектах. Эти изображения используются для идентификации различных видов растительности, выявления изменений растительного покрова по разновременным снимкам и т. д.

Для анализа нарушений лесного покрова исследуемой территории нами был создан ряд индексных изображений, в частности вегетационные индексы (ВИ), предназначенные для анализа именно растительности. Они создаются по данным, полученными в двух наиболее стабильных для растений зонах электромагнитного спектра – красной (R) и ближней инфракрасной (NIR). На первую из них (0,6-0,7 мкм) приходится максимум поглощения солнечной радиации хлорофиллом высших сосудистых растений, а на вторую (0,7-1,0 мкм) – максимум отражения. Рассмотрим эти ВИ подробнее.

DVI – разностный ВИ, который подходит для задач, в которых необходимо подчеркнуть спектральное различие между растительностью и почвой. Индекс может принимать любые значения. Формула для расчёта:

$$DVI = NIR - R \quad (1)$$

NDVI – нормализованный разностный ВИ. Отражает количественную меру активной биомассы. Принимает значения от –1 до 1. Наиболее популярен среди исследователей [18]. Рассчитывается по формуле:

$$NDVI = \frac{NIR-R}{NIR+R} \quad (2)$$

EVI – усовершенствованный ВИ, учитывающий влияние атмосферы, используя данные канала B2 (Blue). Диапазон от -1 до +1. Формула расчета:

$$EVI = \frac{2.5(NIR-R)}{NIR+6R-7.5B} \quad (3)$$

RVI – простой относительный ВИ. Изменяется от 0 до бесконечности. Применяется для нивелирования эффекта альбедо. Рассчитывается по формуле:

$$RVI = \frac{R}{NIR} \quad (4)$$

NRVI – нормализованный относительный ВИ. Рассчитывается по формуле:

$$NRVI = \frac{RVI-1}{RVI+1} \quad (5)$$

SAVI – почвенный ВИ, который учитывает влияние почвы. Диапазон значений от -1 до +1. Рассчитывается по формуле:

$$SAVI = \frac{NIR-R}{NIR+R} (1 + L), \text{ где } L = [0; 1] \quad (6)$$

Также были применены индексы, которые напрямую не связаны с растительностью, но помогают оценить различные условия ее произрастания.

BSI – индекс голой земли, помогает отличить голую почву от растительности и воды. Рассчитывается по формуле:

$$BSI = \frac{(NIR-G)+R}{(NIR+G)+R} (-1) \quad (7)$$

NDWI – нормализованный разностный водный индекс, используется для определения влажности поверхности Земли. Изменяется от -1 до 1. Формула:

$$NDWI = \frac{G-NIR}{G+NIR} \quad (8)$$

NDMI – нормализованный индекс влажности. Характеризует относительное содержание влаги в почве и растениях. Изменяется от -1 до 1. Формула:

$$NDMI = \frac{NIR-SWIR1}{NIR+SWIR1} \quad (9)$$

MNDWI – модифицированный стандартизованный индекс различий воды. Используется для обнаружения водных объектов. Формула расчёта:

$$MNDWI = \frac{G-SWIR}{G+SWIR} \quad (10)$$

Также существуют индексы, предназначенные для идентификации выгоревших лесных территорий (гарей) разного возраста.

NBR (Normalized Burn Ratio) – нормализованный индекс гарей, основанный на соотношении ближнего инфракрасного (NIR) и среднего инфракрасного (SWIR) каналов. NIR-диапазон подчеркивает изменения в яркости гарей, а SWIR – изменения во влажности подстилающей поверхности. Формула:

$$NBR = \frac{NIR - SWIR2}{NIR + SWIR2} \quad (11)$$

NBR2 – модифицированный NBR, подчеркивает чувствительность растительности к воде, полезен в оценке восстановления лесов после пожара:

$$NBR2 = \frac{SWIR1 - SWIR2}{SWIR1 + SWIR2} \quad (12)$$

dNBR (Differenced Normalized Burn Ratio) – разностный нормализованный индекс гарей. Выявляет изменения растительности после пожаров. Формула:

$$dNBR = NBR_p - NBR_a, \quad (13)$$

где: NBR_p и NBR_a, соответственно, индексы гарей до и после пожара.

В качестве источника данных для расчета индексов послужили сцены Landsat-8,9 и Sentinel-2, загруженные с сайта NASA earthexplorer.usgs.gov [19]. Эти снимки поставляются с уже выполненной радиометрической коррекцией и готовы для целевой обработки.

Обработка данных выполнялась, с использованием SAGA GIS. Карты индексов DVI, RVI, NRVI, TVI, CIVI и SAVI созданы с использованием модуля Vegetation Indices (Slope based), EVI – модуля Enhanced Vegetation Indices, индексы NBR, NBR2, dNBR и BSI – с использованием растрового калькулятора. Индексы NDVI, MNDWI и NDMI были получены в готовом виде с использованием интерактивной веб-платформы Esri/Sentinel-2/Landsat Explorer.

Перед целевой обработкой снимков была выполнена топографическая коррекция освещенности в модуле Topographic Correction с использованием ЦМР SRTM. Также была произведена классификации без обучения методами k-means и ISODATA на основе пороговых значений индексов со включением различных ВИ в качестве компонентов неконтролируемой классификации.

Результаты и обсуждение

В целях получения границ эталонов для расчёта значений искомым индексов была выполнена процедура контролируемой классификации методом минимального расстояния. На ключевые участки были получены индексные изображения и выполнен их анализ на предмет возможности их применения в интересах дистанционного мониторинга и картографирования лесов (рис. 1).

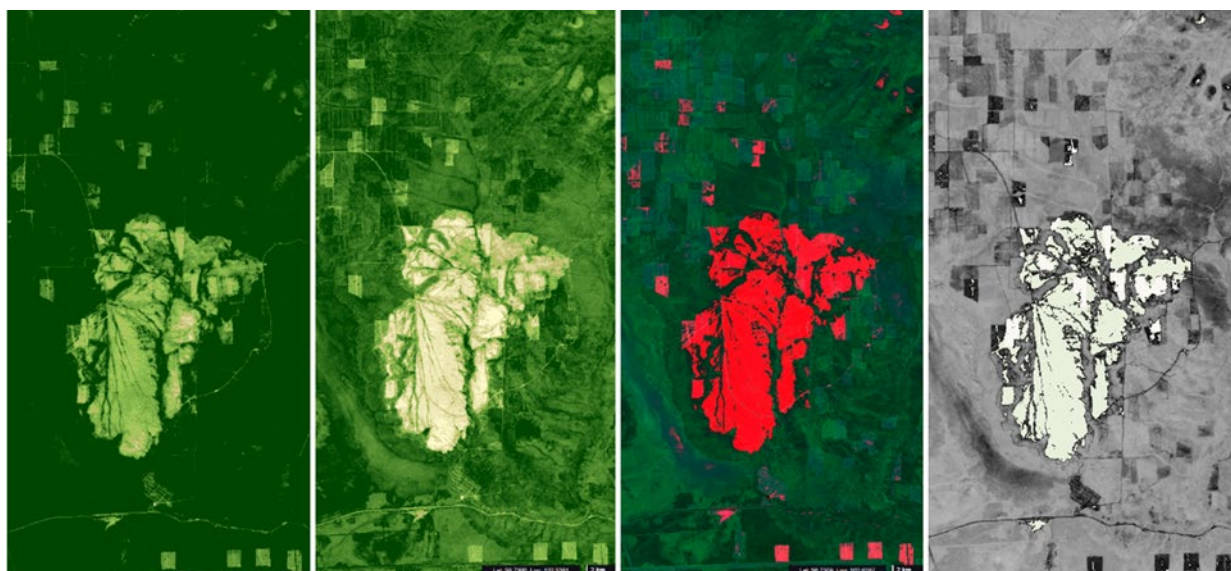


Рис. 1. ВИ ключевого участка Мамырь: а) NDVI, б) EVI, в) BSI, г) NBR. В центре гарь от пожара 26-28 июня 2018 г. (Landsat-8, 09.08.2018)

Значения полученных индексов для различных видов ландшафтов ключевого участка в районе поселка Мамырь отражены в табл. 1.

Таблица 1 – Значения индексов ключевого участка Мамырь

	Свежая гарь	Старая гарь	Свежая вырубка	Старая вырубка	Смешанный лес	Хвойный лес	Кустарник	Застройка, дороги	Открытая вода
NDMI	-0,60	0,01	0,10	0,67	0,56	0,63	0,28	0,07	0,34
DVI	0,03	0,21	0,25	0,45	0,65	0,27	0,30	0,10	-0,03
NDVI	0,03	0,31	0,17	0,48	0,50	0,34	0,27	0,13	-0,05
MNDWI	-1,70	-0,61	-0,40	-0,19	-0,16	-0,10	-0,43	-0,25	0,57
NDWI	-0,03	-0,24	-0,22	-0,38	-0,36	-0,41	-0,24	0,11	0,04
EVI	0,01	0,04	0,07	0,20	0,18	0,27	0,11	0,04	0,00
RVI	1,07	1,24	1,42	2,75	2,81	1,78	1,83	1,23	0,91
NRVI	0,02	0,27	0,17	0,46	0,48	0,29	0,28	0,11	0,00
TVI	0,73	0,80	0,82	0,94	1,00	0,89	0,87	0,78	0,66
SAVI	0,02	0,17	0,22	0,57	0,56	0,30	0,31	0,11	-0,02
BSI	0,06	0,06	0,07	-0,14	-0,12	-0,19	-0,00	0,02	-0,01
NBR	-0,15	0,16	0,07	0,29	0,29	0,42	0,14	0,06	-0,01
NBR2	-0,04	0,03	0,12	0,12	0,13	0,17	0,13	0,04	-0,00

На территорию Мамырской гари дополнительно был определен разностный нормализованный индекс гарей dNBR.

Разрешение снимков Landsat-8 (30 м/пикс) обеспечивает хорошую естественную оптическую генерализацию индексных изображений при условии исключения из обработки «смешанных» пикселей.

Slope-based ВИ (NDVI, SAVI, EVI), которые рассчитываются на основе наклона линии «почва-растительность» в пространстве спектральных признаков для R и NIR каналов, наиболее просты в использовании и дают числовые результаты, которые легко интерпретировать. В то же время, все slope-based индексы не способны свести к минимуму фоновые эффекты почвы.

Индекс DVI требует масштабирования, что неудобно при анализе снимков разных территорий или времени съемки. Лучше использовать индекс NDVI, поскольку он в наилучшей степени способен минимизировать топографические эффекты в процессе идентификации растительности. Увеличение значений NDVI характерно для зарастающих гарей и вырубок. По мере восстановления лесов, NDVI приближается к своим значениям до пожара. Значения NDVI устойчивы для разных объектов одной и той же территории одного и того же момента съемки. Однако, эта устойчивость нарушается по мере увеличения площади исследуемой территории и изменения времени съемки. Кроме того, NDVI хорошо выявляет наличие или отсутствия леса, но плохо отличает вырубки от гарей, что требует привлечения данных о форме и текстуре объектов.

Индекс NBR хорошо отделяет гари от здорового леса и оптимален для обнаружения следов пожаров. По мере зарастания гарей NBR увеличивается.

Для разностного индекса гарей dNBR характерна отрицательная динамика, что также свидетельствует о постепенном зарастании гарей. Скорость восстановления зависит от породного состава леса и типа пожара.

Индекс SAVI позволяет минимизировать шумовое влияние почвы. Он более точен для оценки зелёной растительной массы при высокой влажности почвы.

Индекс EVI существенно снижает фоновый шум, атмосферный шум, отфильтровывая рассеянное коротковолновое излучение.

Значения индекса RVI больше 1 идентифицируют зеленую растительность и возрастают с увеличением зеленой фитомассы и сомкнутости растительности.

Высокие значения NDMI указывают на высокое содержание влаги в растительности, низкие – на низкое, что помогает отличить вырубку от гари.

Положительные значения NDWI указывают на наличие открытой воды. Недостатком индекса является то, что он дает положительные значения для зданий, дорожных покрытий, и голых грунтов, принимая их за воду. Этого недостатка лишен индекс MNDWI.

Индексные карты весьма эффективны при классификации без обучения методами k-means или ISODATA, которые автоматически разделяют изображение на заданное количество классов на основе значений пикселей исходных каналов. Кластеризация работает точнее при объединении в один стек каналов NIR, SWIR-1, SWIR-2 и карт NDVI, NBR, NDMI, взятых как отдельный слой, что позволяет увереннее выделять дешифровочные признаки классов растительности, уменьшает шумы, ускоряет расчеты и повышает их точность.

Все индексы сильно зависят от шумовых эффектов почвы, атмосферы, рельефа, пространственного разрешения, сезона, наличия водоемов и сооружений. Поэтому сложно сравнивать индексные изображения разновременных снимков, а также снимков разных географических зон.

Подбор снимков ограничен коротким периодом вегетации, повторяемостью съемки, облачностью (65-70%). ВИ, полученные по данным разных спутников, не совсем идентичны, вследствие различий значений центральных волновых чисел и ширины полос пропускания одноименных каналов.

Несмотря на большое количество индексов (только вегетационных около двухсот) [20], нет ни одного универсального для идентификации разных типов растительного покрова в разных географических условиях, что требует полевой верификации и экспертного сопровождения для конкретных территорий.

Заключение

Снимки среднего разрешения оптимальны для создания индексных изображений, так как вследствие естественной оптической генерализации не требуют сложных алгоритмов расчета, что позволяет легко получать индексные карты практически во всех программах обработки растровых данных.

Индексные карты позволяют эффективно выявляют участки, лишённые растительности, а также зоны с низкой степенью вегетации, что критично для анализа и картографирования состояния приангарской тайги на нарушенных землях: горях, вырубках, карьерах и отвалах; отслеживать динамику растительности на нарушенных землях. Это позволяет назначать мероприятия по рекультивации нарушенных участков и планировать организацию хозяйственной деятельности таежных территорий Приангарья.

Включение индексных изображений во входные пакеты для компьютерной классификации космических снимков значительно повышает ее качество. В то же время, вегетационные индексы не дают абсолютных количественных показателей, но относительные оценки можно пересчитать в абсолютные на основе полевых стационарных и маршрутных данных с привлечением экспертов.

БИБЛИОГРАФИЧЕСКИЙ СПИСОК

1. Пластинин Л.А. Ступин В.П. Картографо-космический мониторинг зоны воздействия водохранилищ ангарского каскада / Иркутск: Изд-во ИрНТУ. – 2018 г. – 180 с.
2. Хамедов В. А. Применение радарных данных Sentinel-1 для оценки состояния растительного покрова // Региональные проблемы дистанционного зондирования Земли. – Красноярск: СФУ, 2022. – С. 155-158.
3. Алтынцев М. А., Гордиенко А. С., Гук А. А. Вейвлет-анализ для выявления вырубок в лесных массивах по аэрофотоснимкам // ГЕО-Сибирь-2010. – Новосибирск: СГГА, 2010. Т. 4, ч. 1. – С. 3–8.
4. Барталев С. А., Егоров В. А., Жарко В. О. и др. Спутниковое картографирование растительного покрова России. – Москва: ИКИ РАН, 2016. – 208 с.
5. Ващук Л.Н., Пластинин Л.А., Ступин В.П. и др. Картографирование лесов Сибири с использованием новых материалов спутниковых радарных съемок // География на рубеже веков. Иркутск, 2001. – С. 221-222.
6. Аксенов, Д. Е. Космические снимки для задач лесного хозяйства // Земля из космоса. – 2009. – № 1. – С. 10-15.
7. Rouse J.W., Haas R.H., Schell J.A. Deering D.W, 1973. Monitoring Vegetation Systems in the Great Plains with ERTS. Third ERTS Symposium, NASA SP-351 I: 309-317. 99.
8. Tucker C.J., 1979. Red and Photographic Infrared Linear Combinations for Monitoring Vegetation. Remote Sensing of the Environment 8:127-150.

9. Пластинин, Л. А., Ступин В. П., Олзоев Б. Н. Картографо-космический мониторинг природных и антропогенных процессов и явлений Байкальского региона // Гео-Сибирь. – 2019. – Т. 1, № 2. – С. 178-184.
10. Клевцов, Е. В., Коптев А. В. Космический мониторинг таежных геосистем Байкальского региона // Вестник Иркутского государственного технического университета. – 2011. – № 11(58). – С. 63-67.
11. Пластинин Л. А., Ступин В. П., Хамедов В. А. Методология и методическое обоснование картографо-космического мониторинга растительного покрова Сибири // Региональные проблемы дистанционного зондирования Земли. – Красноярск: СФУ, 2023. – С.261-265.
12. Пластинин Л.А., Ступин В.П., Хамедов В.А. Космический мониторинг трансформации лесного покрова зоны влияния каскада Ангарских водохранилищ Региональные проблемы дистанционного зондирования Земли. – Красноярск: СФУ, 2024. – С. 261-267.
13. Ступин В.П. ГИС-анализ спектрально-зональных снимков в целях картографо-космического мониторинга вырубок и гарей таежных лесов Приангарья // ГЕО-Сибирь. Геодезия, геоинформатика, картография, маркшейдерия. – Новосибирск: СГУГиТ, 2024. Т. 1.
14. Пластинин Л.А., Ступин В.П., Хамедов В.А. Методология и методическое обоснование картографо-космического мониторинга растительного покрова Сибири // Региональные проблемы дистанционного зондирования Земли. – Красноярск, изд-во СФУ, 2023 – С. 261-265.
15. Гордиенко А.С. Применение индексных изображений при выявлении изменений по разновременным космическим снимкам // ГЕО-Сибирь. Дистанционные методы зондирования Земли и фотограмметрия, мониторинг окружающей среды, геоэкология – Новосибирск: СГУГиТ, 2015. Т. 1. – С. 67-70.
16. Soverel N. O., Perrakis D.D.B., Coops N.C., 2010, Estimating burn severity from Landsat dNBR and RdNBR indices across western Canada: Remote Sensing of Environment, v. 114, no. 9, p. 1896-1909.
17. Sellers P.J., 1985. Canopy Reflectance, Photosynthesis and Transpiration. International Journal of Remote Sensing 6:1335-1372.
18. NDVI – теория и практика [Электронный ресурс]. URL: <http://gislab/info/ga/ndvi.html>, свободный. – Яз. рус. – Дата обращения: 10.01.2017 г.
19. Официальный сайт Геологической Службы Соединённых Штатов – USGS [Электронный ресурс]. – Режим доступа: <http://www.usgs.gov> свободный. – Загл. с экрана.
20. Index Data Base [Электронный ресурс]. URL: <https://www.indexdatabase.de>, свободный - Яз. англ. – Дата обращения 28.03.2026 г.

© В. П. Ступин 2026