ПОСТРОЕНИЕ КАРТ СОСТОЯНИЯ ЛЕСНЫХ МАССИВОВ ПО ДАННЫМ ДИСТАНЦИОННОГО ЗОНДИРОВАНИЯ ЗЕМЛИ

С.А. Орлов, К.С. Цыгулёв, Р.А. Секриеру, А.А. Авершин

Вычислительный центр ДВО РАН

Проблема и цель исследования

Воздействие горных работ

Добыча полезных ископаемых может приводить к деградации лесной растительности и нарушению устойчивости природных экосистем.

Для Дальневосточного федерального округа, как одного из наиболее лесистых и одновременно активно осваиваемых горнодобывающей промышленностью регионов России, проблема экологического мониторинга лесных массивов стоит особенно остро. Масштабы и темпы этого освоения определяют потребность в оперативных методах контроля состояния лесных массивов и оценки влияния на них неблагоприятных факторов.

Существующие подходы

В России, в частности на юге Дальнего Востока, разработаны методики геоинформационного мониторинга природно-технических систем по данным дистанционного зондирования, предложены ГИС-инструменты для оценки потенциала самовосстановления растительности на нарушенных участках.

За рубежом широкое распространение получили подходы, основанные на анализе временных рядов вегетационных индексов для отслеживания деградации и восстановления растительности на отвалах и в зонах рекультивации.

Потребность мониторинга

В большинстве случаев существующие методики опираются на общие показатели, например, NDVI (Normalized Difference Vegetation Index), и не предусматривают разделение лесных массивов по типам.

Исходя из этого, существует необходимость пространственной оценки состояния лесов, учитывающей тип лесного массива и пригодной для анализа больших территорий по спутниковым данным.

Проблема и цель исследования

ЦЕЛЬ РАБОТЫ

Разработка и апробация алгоритма экологического картирования горнопромышленных регионов по спутниковым наблюдениям с предварительным разделением лесов на хвойные, лиственные и смешанные и последующей оценкой состояния растительности

Ключевой результат – карта состояния лесных массивов, отражающая уровень покрытия листовой поверхностью и позволяющая выполнить предварительную оценку биоценоза.

Районы исследования

Хабаровский край	Приморский край
запов. Ботчинский	База «Восток»
с. Лермонтовка	с. Самарка
с. Эворон	п. Лучегорск

Зачем выбраны разные участки?

Совокупность территорий включает три требуемых класса лесного покрова и разные степени антропогенной трансформации – от слабо нарушенных лесов до районов, испытывающих в том числе горнопромышленное воздействие. Это позволяет проверить методику в неодинаковых природных и хозяйственных условиях.

Исходные спутниковые данные

В качестве исходных данных использовались снимки со спутников Sentinel-2 второго уровня обработки

Канал	Название	Длина волны, нм	Разрешение, м
B01	Coastal aerosol	433 – 453	60
B02	Blue	458 – 523	10
B03	Green	543 – 578	
B04	Red	650 – 680	
B05	Red-edge	698 – 713	20
B06	Red-edge	733 – 748	
B07	Red-edge	773 – 793	
B08	NIR	785 – 900	10
B08A	NIR	855 – 875	20
B09	Water vapour	935 – 955	60
B10	SWIR	1360 – 1390	
B11	SWIR	1565 – 1655	20
B12	SWIR	2100 – 2280	

Дополнительный источник

Global Forest Canopy Height 2019 (GFCH 2019) – глобальная карта высоты лесного полога. Использовалась для предварительного выделения пикселей, относящихся к лесным территориям.



Обработка данных

- Отбирались снимки в **два временных периода** с минимальной облачностью
- В QGIS формировался набор спектральных каналов и выполнялась обрезка по границам участков
- Все каналы приводились к единому пространственному разрешению 10 м
- Перед классификацией исключались облака и их тени

Исходные спутниковые данные

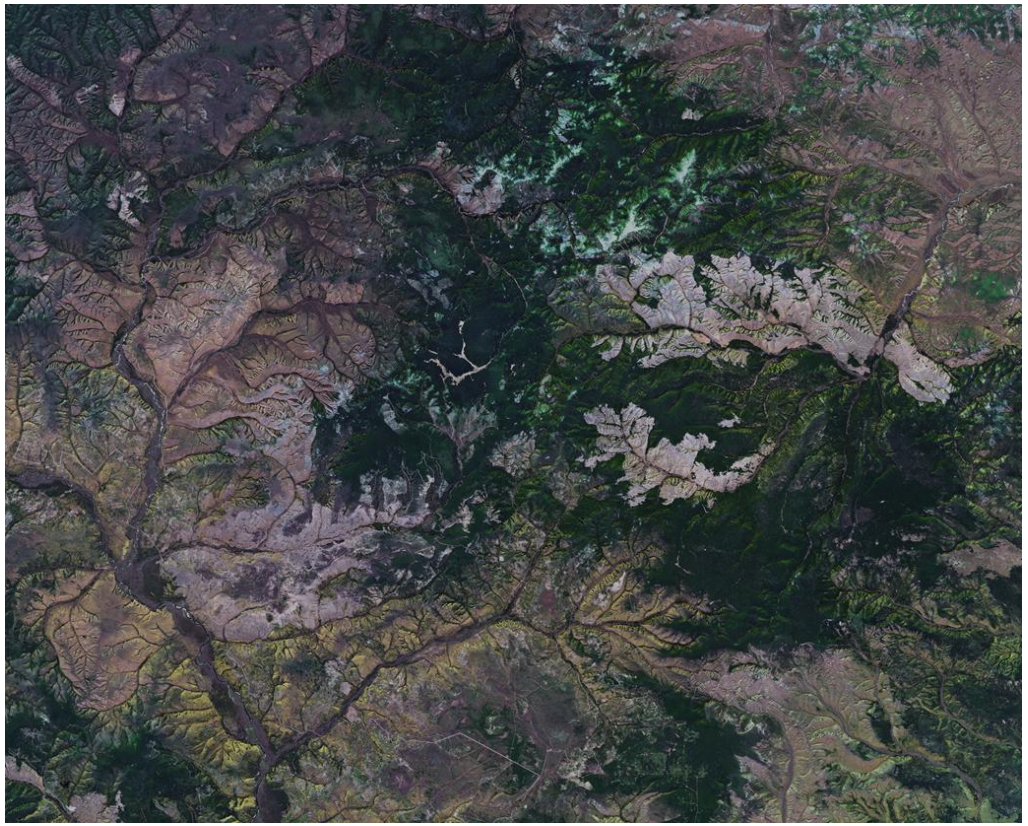
Период S – максимум вегетации

Полное облиственение лиственных пород. Этот период информативен для определения лиственных и смешанных лесов



Период W – конец листопада до выпадения снега

Листва листопадных пород отсутствует, поэтому хвойный покров становится более различимым



Этапы алгоритма экологического картирования

1 Маска леса

Формирование маски леса, используя данные GFCH 2019, с исключением облаков на снимках

2 Сезонные индексы

Расчёт индекса SARVI (Soil and Atmospherically Resistant Vegetation Index) на снимках в периоды S и W

3 Классификация

Расчет порогов SARVI по методу Оцу, позволяющие определить хвойный, лиственный и смешанный леса

4 Опорный Leaf Area Index (LAI)

Получение значений LAI из биофизического процессора ESA SNAP в качестве эталонных данных

5 Регрессия

Расчёт формулы экспоненциальной зависимости LAI от вегетационного индекса для каждого типа леса

6 Карта состояния

Нормирование значений LAI по их верхней границе, эмпирически подобранной для каждого типа леса

Таким образом, для каждого пикселя, относящегося к лесу, определяется его тип и рассчитывается относительный уровень покрытия листовой поверхностью

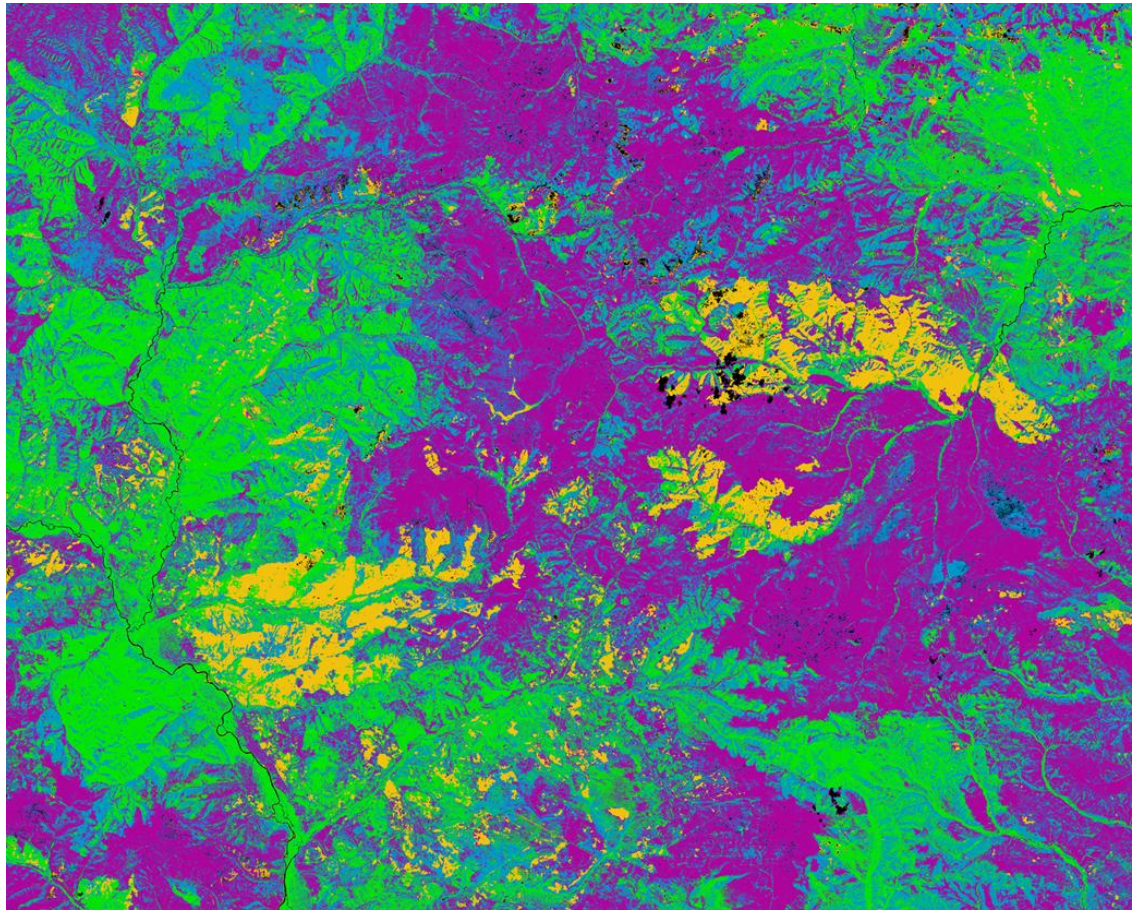
Классификация типов леса по сезонной динамике SARVI

1. На снимках по GFCH 2019 выделяется маска пикселей, относящихся к лесу, отбирая значения высоты от 4 м до 60 м

2. Для каждого периода рассчитывается SARVI и методом Оцу определяется порог, разделяющий низкие и высокие значения индекса

Пороги рассчитывались индивидуально для каждой территории

3. Класс задаётся сочетанием положения SARVI относительно определенных порогов:



Хвойный лес
SARVI (S) ниже порога; SARVI (W) выше порога

Лиственный лес
SARVI (S) выше порога, SARVI (W) ниже

Смешанный лес
Все оставшиеся пиксели, относящиеся к лесу

Кустарники и трава
Пиксели растительности, не относящиеся к лесу

Без растительности
Все оставшиеся пиксели снимка

Оценка состояния растительности: индекс LAI (Leaf Area Index)

Что характеризует LAI

Показатель отражает площадь фотосинтезирующей поверхности растительного покрова и используется как индикатор его состояния

Откуда получены опорные значения

LAI рассчитывался биофизическим процессором ESA SNAP. Для этого в нем используются нейронные сети, обученные на данных, сформированных моделями переноса излучения

Экспоненциальная регрессия

$$LAI = a \cdot e^{(b \cdot VI)}$$

VI – выбранный вегетационный индекс; a и b – коэффициенты, подбираемые отдельно для типа леса и индекса. Регрессия строится по парным значениям VI и LAI, полученным из спутниковых данных и ESA SNAP.

Практический смысл: после калибровки вместо запуска более сложного биофизического процессора для каждого пикселя можно использовать простую регрессионную формулу, снижая вычислительные и временные затраты.

Сравниваемые индексы

Normalized difference vegetation index (NDVI)

Простой и широко используемый показатель для оценки количества и состояния растительного покрова

$$NDVI = (NIR - Red) / (NIR + Red)$$

Atmospherically Resistant Vegetation Index (ARVI)

Модификация NDVI, снижающая искажения, вызванные рассеянием света в атмосфере, за счет синего спектрального канала и коэффициента γ

$$ARVI = (NIR - RED - \gamma \cdot (Red - Blue)) / (NIR - RED - \gamma \cdot (Red - Blue))$$

Soil-Adjusted Vegetation Index (SAVI)

Модификация NDVI с коррекцией по почве с помощью коэффициента L

$$SAVI = (NIR - Red) / (NIR + Red + L) \cdot (1 + L)$$

Soil and Atmospherically Resistant Vegetation Index (SARVI)

Модификация ARVI, объединяющая в себе черты как атмосферной коррекции, так и поправки на влияние открытой почвы

$$SARVI = (1 + L) \cdot (NIR - RED + \gamma \cdot (Blue - Red)) / (NIR + RED - \gamma \cdot (Blue - Red) + L)$$

Калибровка регрессионных моделей LAI

Индекс	Тип леса	a	b	R^2	$\bar{A}$
NDVI	Хвойный	0,8276	1,0027	0,3377	0,0826
	Смешанный	0,5805	1,4500	0,3980	0,0730
	Лиственный	0,7734	1,2871	0,3920	0,0429
SAVI	Хвойный	0,7188	2,6156	0,5344	0,0689
	Смешанный	0,6211	2,9253	0,8718	0,0548
	Лиственный	0,5978	3,0274	0,7235	0,0508
ARVI	Хвойный	1,0426	0,6756	0,2944	0,0860
	Смешанный	0,8596	0,9068	0,2490	0,0804
	Лиственный	1,1577	0,7916	0,3036	0,0477
SARVI	Хвойный	0,7970	2,3453	0,5255	0,0672
	Смешанный	0,6293	2,8850	0,8378	0,0568
	Лиственный	0,6269	2,9375	0,6328	0,0546

Как читать таблицу

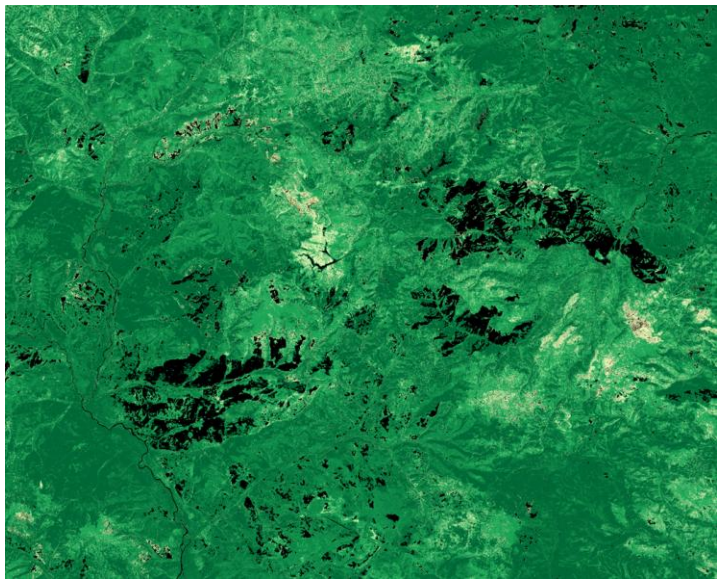
a и b – параметры модели LAI = a · e ^ (b · VI).
R^2 – коэффициент детерминации;
$\bar{A}$ – средняя ошибка аппроксимации.

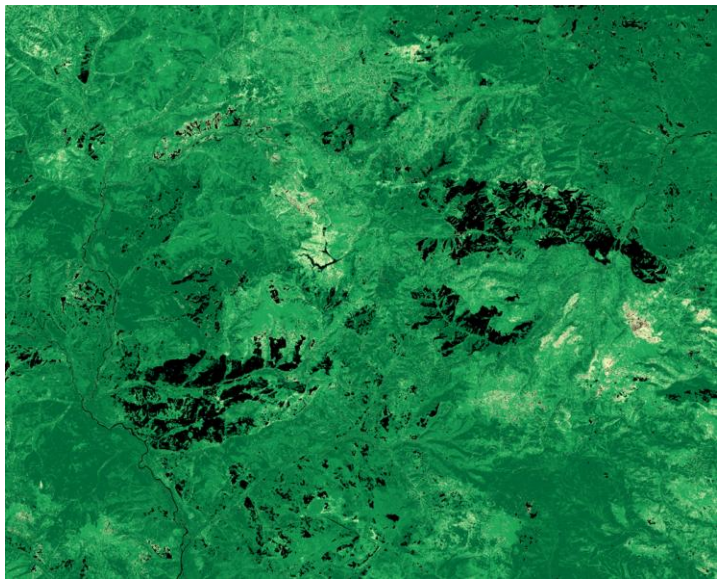
Наибольшее R^2 в таблице:
SAVI для смешанного леса (0,8718) и
SARVI для смешанного леса (0,8378).
В целом SAVI и SARVI дают более высокие R^2, чем NDVI и ARVI.

Важно: значения являются результатом аппроксимации относительно LAI из ESA SNAP, а не прямой проверкой по наземным измерениям.

Результат: карты состояния лесных массивов

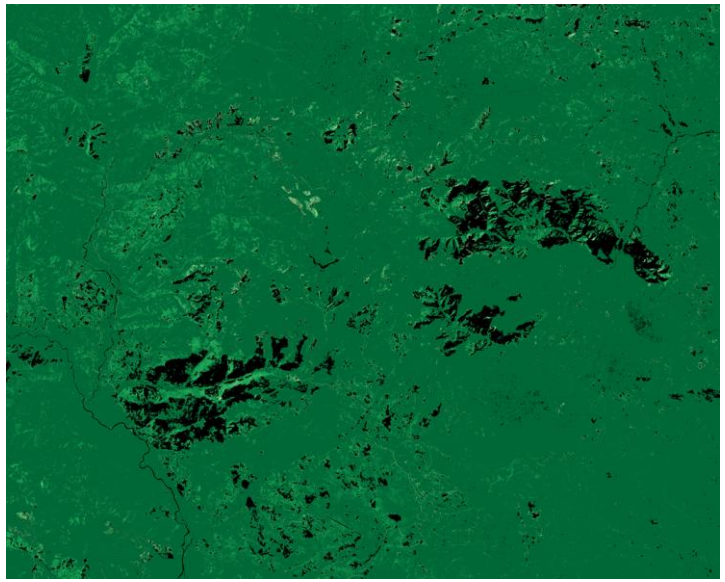
FH (SAVI)

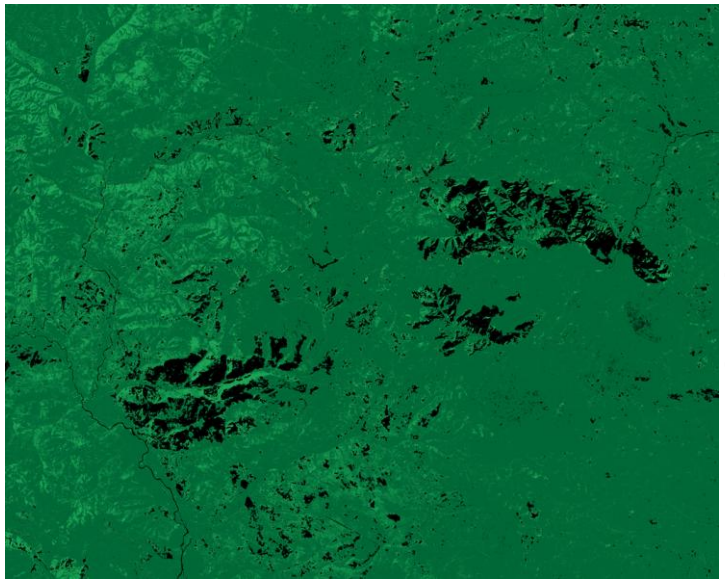




FH (SARVI)

FH (NDVI)





FH (ARVI)

Шкала FH

- Отсутствие леса
- 0–40% – низкий уровень покрытия
- 40–60% – умеренно низкий
- 60–80% – средний
- 80–100% – высокий
- >100% – выше условного порога LAI_{max}

LAI_{max} эмпирически рассчитан отдельно для каждого типа леса. FH показывает отношение рассчитанного LAI к LAI_{max}, выраженное в процентах.

Интерпретация результатов и выявленные ограничения

Вывод из сравнительного анализа

Сравнение показало, что для рассматриваемых данных предпочтительно использовать SAVI при расчёте LAI и построении карты состояния лесного покрова. NDVI на участках прямого падения света дают заниженные значения LAI, а атмосферная коррекция Sentinel-2 Level-2A уменьшает дополнительную пользу атмосферной коррекции SARVI.

Выявленные ограничения

Облачность региона

Частая облачность ограничивает получение регулярных безоблачных снимков и затрудняет непрерывный мониторинг.

Маска леса GFCH 2019

Продукт имеет погрешность и отражает состояние лесного полога на конкретный год; это может влиять на корректность выделения лесных пикселей.

Калибровка LAI

Коэффициенты регрессий основаны на оценках ESA SNAP, а не на наземных измерениях. Независимая проверка точности пока необходима.

Дальнейшее развитие

Наземная или иная независимая верификация; построение временных рядов; адаптация алгоритма к действующим и отработанным горнопромышленным объектам.

Выводы

- Разработана и апробирована методика построения карт состояния лесных массивов по данным дистанционного зондирования Земли
- Для оценки состояния растительности построены экспоненциальные регрессии LAI от NDVI, SAVI, ARVI и SARVI с отдельными коэффициентами для типов леса
- Сравнение показало, что наиболее устойчивые оценки LAI для исследованных территорий обеспечивает SAVI
- Итоговые карты FH позволяют выполнить предварительную оценку уровня покрытия листовой поверхностью и определить участки, требующие более детального анализа

Практическая значимость: основа для пространственного мониторинга состояния лесных массивов