

## Метод мониторинга лесовосстановления на основе совместного анализа оптико-микроволновых данных на плоскости NDVI – RVI

И. И. Кирбижекова, Т. Н. Чимитдоржиев, А. В. Дмитриев

*Институт физического материаловедения СО РАН, Улан-Удэ, 670047, Россия  
E-mail: kirbizhekova@bk.ru*

Предлагается метод комплексной оценки состояния и динамики лесного подростка на основе комбинирования мультиспектральных оптических снимков и данных спутниковой радиолокации дециметрового диапазона длин волн. Предварительно на примере участка восстановления леса после пожара было установлено, что при раздельном анализе вегетационного и радарного индексов (NDVI — *англ.* Normalized Difference Vegetation Index, RVI — *англ.* Radar Vegetation Index) прогноз лесовосстановления до уровня значений, соответствующих контрольному участку соснового леса, существенно разнится. Поэтому временную динамику участка лесовосстановления предлагается оценивать на плоскости NDVI – RVI относительно контрольных участков хвойного и смешанного леса, а также безлесного участка. Показано, что эти участки формируют подвижную треугольную зону, внутри которой изменения вегетационных индексов характеризуют увеличение проективного покрытия лесным подростом, рост надземной биомассы и замещение/восстановление основной породы. Для описания такой динамики введены два количественных индекса: DRI — показатель степени лесовосстановления и RSI — показатель степени восстановления основной породы. В качестве инструмента оперативной обработки, для возможного масштабирования результатов, использован современный функционал облачной платформы Google Earth Engine (GEE), при помощи которой получены значения NDVI по данным Landsat-5, -8 за 2007–2020 гг. зимнего (снежного) периода. Последнее позволило нивелировать влияние почвы и травы при оценке динамики крон лиственных деревьев (без листвы) и вечнозелёных хвойных насаждений. Радарный вегетационный индекс RVI для исследования изменений биомассы лесной растительности также был получен с использованием GEE по данным спутниковых радиолокаторов с синтезированной апертурой (PCA) L-диапазона ALOS-1 PALSAR-1 (*англ.* Advanced Land Observing Satellite, *англ.* Phased Array type L-band Synthetic Aperture Radar) (2006–2010) и ALOS-2 PALSAR-2 (2016–2020).

**Ключевые слова:** дистанционное зондирование, оптико-микроволновые данные, NDVI, RVI, временные ряды, послепожарное лесовосстановление

Одобрена к печати: 04.07.2023

DOI: 10.21046/2070-7401-2023-20-4-165-174

### Введение

В связи с климатическими изменениями и стремлением мирового сообщества к низкоуглеродному развитию актуальна проблема глобального мониторинга лесных ресурсов. Разработаны различные модели, прогнозирующие положительный или отрицательный углеродный баланс лесов к 2100 г. (Bellassen, Luysaert, 2014; Jiang et al., 2020). Выполняются различные оценки поглощающей способности леса. Например, показано отсутствие значимых изменений углеродного стока после прореживания леса и выборочных рубок (Pinnington et al., 2017), т.е. существует определённый порог насыщения и стабилизации процесса поглощения углерода лесными экосистемами. Вместе с тем в ряде работ показана особая роль молодого леса. Так, установлено, что поглощение углерода в зрелых тропических лесах и бореальных лесах Сибири составляет в среднем 0,85 Пг/год ( $1 \text{ Пг} = 10^{15} \text{ г} = 10^{12} \text{ кг}$ ), а для лесного подростка — 1,30 Пг/год (Pugh et al., 2019). В Латинской Америке (Chazdon et al., 2016) также подтверждена значимая роль лесного подростка: молодой лес после сплошных рубок активно накапливает углерод в надземной биомассе, тем самым частично уравнивая выбросы углерода в результате сжигания ископаемого топлива, деградации лесов и других

факторов антропогенного происхождения. Подобные результаты исследований свидетельствуют о необходимости выполнения масштабной дистанционной оценки площадей лесного подростка и зрелого леса. Поэтому для правильного расчёта углеродного баланса лесов необходимы разработка и развитие технологий оценки и мониторинга пространственно-временных изменений биомассы лесной растительности с акцентом на участки лесного молодняка. В этом направлении перспективными представляются методы комбинирования дистанционной спутниковой информации разных диапазонов электромагнитного излучения. Например, высокую эффективность показали методы комбинирования оптических и радиолокационных данных дистанционного зондирования Земли (ДЗЗ) для процессов залесения сельскохозяйственных полей и лесовосстановления после рубок и пожаров (Дмитриев и др., 2022а, б; Родионова и др., 2020; Vondur et al., 2022).

Известно, что информация о лесных ресурсах, получаемая по данным оптического и микроволнового диапазонов, различается вследствие множества факторов, в основном из-за разницы проникающей способности электромагнитных волн разного диапазона и геометрии съёмки (Барталев и др., 2022; Чимитдоржиев и др., 2018; Lehmann et al., 2015). Так, по мультиспектральным оптическим снимкам традиционно оцениваются породный состав и проективное покрытие растительностью (Ховратович и др., 2019), что связано с отражением солнечного света на уровне листвы и хвои. В результате выполняется оценка спектральных характеристик самого верхнего слоя лесной среды. Для этого принято использовать различные вегетационные индексы (Чимитдоржиев, Ефременко, 1998), которые в том числе позволяют определить проективное покрытие лесным подростом. Однако оценка прироста лесной биомассы (увеличения размеров ветвей и стволов деревьев) при сплошном проективном покрытии по мультиспектральным оптическим данным затруднительна. Для этой цели используются космические радиолокаторы с синтезированной апертурой (РСА). Проникающая способность микроволнового излучения РСА возрастает с длиной волны и в длинноволновых L- и P-диапазонах (длины волн 23 и 80 см) становится достаточной, чтобы исследовать структуру лесного полога.

На начальном этапе геометрические размеры и общая надземная биомасса лесного подростка малы, что делает их вклад в обратное радарное рассеяние от шероховатой земной поверхности незначительным. В дальнейшем, по мере роста молодых деревьев, увеличивается их биомасса, количество и толщина ветвей, усложняется геометрическая структура. Неоднородности леса становятся соизмеримыми с длиной волны радиолокатора, что приводит к увеличению обратного радарного рассеяния и заметным эффектам деполяризации сигнала. Это позволяет зафиксировать момент появления лесного подростка. Как правило, обратное рассеяние от лесной среды увеличивается с ростом надземной биомассы, выходя на плато на некотором предельном значении. Данный эффект насыщения зависит от длины волны зондирующего излучения и достигается при следующих пороговых величинах надземной биомассы: в P-диапазоне — 200 т/га, в L-диапазоне — 100 т/га (Dobson et al., 1992; Le Toan et al., 1992; Yu, Saatchi, 2016). Тем не менее рост деревьев может продолжаться, хотя уже и не такой интенсивный.

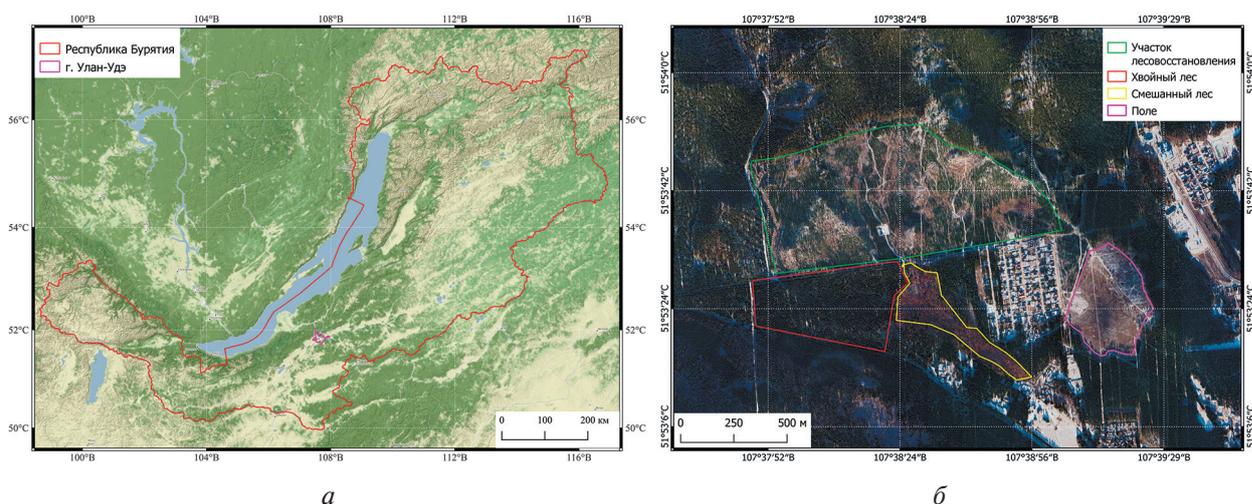
В настоящее время на орбите функционирует один спутниковый радиолокатор L-диапазона ALOS-2 PALSAR-2 (*англ.* Advanced Land Observing Satellite, *англ.* Phased Array type L-band Synthetic Aperture Radar). На 2023–2025 гг. запланированы запуски радиолокаторов: PALSAR-3 L-диапазона японского аэрокосмического агентства (*англ.* Japan Aerospace Exploration Agency — JAXA), NISAR (*англ.* NASA-ISRO Synthetic Aperture Radar) L- и S-диапазонов — совместного проекта NASA (*англ.* National Aeronautics and Space Administration, Национальное управление по авиации и исследованию космического пространства — НАСА) и индийского космического агентства (*англ.* Indian Space Research Organisation — ISRO), BIOMASS P-диапазона Европейского космического агентства (*англ.* European Space Agency — ESA). Последний предназначен для измерений биомассы леса с целью глобальной оценки потоков углерода ([https://www.esa.int/Applications/Observing\\_the\\_Earth/FutureEO/Biomass](https://www.esa.int/Applications/Observing_the_Earth/FutureEO/Biomass)), и для него уже апробированы алгоритмы измерений и созданы форматы представления данных (Banda et al., 2020). Кроме того, уже обновлены глобальные

карты, характеризующие распределение биомассы леса на основе данных ДЗЗ (<https://www.eo4sd-forest.info/global-biomass>; Santoro et al., 2018).

Цель настоящей работы — создание метода дистанционного комплексного мониторинга состояния и динамики лесного подроста, позволяющего разделить хвойные и лиственные породы с относительной оценкой изменения проективного покрытия растительностью и биофизических параметров древостоя. В качестве инструмента для исследований предлагается использовать современный подход, предполагающий применение облачных вычислений на веб-платформе Google Earth Engine (GEE) (Gorelick et al., 2017) для получения временных рядов вегетационных индексов NDVI (*англ.* Normalized Difference Vegetation Index — нормализованный разностный вегетационный индекс) и RVI (*англ.* Radar Vegetation Index — радарный вегетационный индекс).

## Описание тестового участка и используемые данные

Территория исследования расположена в окрестностях г. Улан-Удэ, в предгорьях хр. Улан-Бургасы, географические координаты: 107,64° с.ш., 51,90° в.д. Рельеф местности — горный, с высотами 680–800 м н.у.м. (над уровнем моря) и уклонами склонов до 30°. В 2003 г. в результате пожара здесь полностью выгорел лес на площади 69 га. После лесного пожара в низинах и на пологих склонах были посажены саженцы сосны обыкновенной. На остальной территории происходит естественное восстановление леса. На *рис. 1* представлено местоположение и схема расположения участка лесовосстановления (контур зелёного цвета на *рис. 1б*) и трёх контрольных участков площадью 21, 9 и 14 га. В настоящий момент возраст молодняка варьируется от 1 года до 19 лет, высота не превышает 4 м. На первом контрольном участке произрастает сосновый лес (красный контур на *рис. 1б*), аналогичный лесу исследуемого участка в допожарный период. Второй контрольный участок (жёлтый контур на *рис. 1б*) представляет собой смешанный лес со следующим породным составом: лиственница — 65 %, берёза — 32 %, сосна — 3 %. Открытый безлесный участок выделен контуром сиреневого цвета на *рис. 1б* и обозначен «поле», а для анализа будут использованы усреднённые по времени величины NDVI и RVI этого участка.



*Рис. 1.* Местоположение территории исследования (*а*); схема расположения участка лесовосстановления и контрольных участков на местности (Google Earth) (*б*)

Значения вегетационного индекса NDVI по данным Landsat-5 ([https://developers.google.com/earth-engine/datasets/catalog/LANDSAT\\_LT05\\_C01\\_T1\\_32DAY\\_NDVI](https://developers.google.com/earth-engine/datasets/catalog/LANDSAT_LT05_C01_T1_32DAY_NDVI)) и Landsat-8 ([https://developers.google.com/earth-engine/datasets/catalog/LANDSAT\\_LC08\\_C01\\_T1\\_32DAY\\_](https://developers.google.com/earth-engine/datasets/catalog/LANDSAT_LC08_C01_T1_32DAY_)

NDVI) в зимнее время 2007–2020 гг. были извлечены непосредственно из каталога GEE. Выбор NDVI за зимний период (со снежным покровом) позволяет нивелировать влияние зелёной травы и почвы при оценке изменений NDVI для лиственных деревьев (стволов и ветвей на фоне снега) и вечнозелёной сосны. При этом необходимо отметить, что на фоне неизменного белого снега (NDVI близок к нулю) NDVI для смешанного леса (лиственница, берёза, осина, сосна) характеризует проективное покрытие ветвями без зелёной листвы (хвои лиственницы) и фактически этот параметр будет сопоставляться с таковым для лесного подроста.

Радарный вегетационный индекс RVI по данным с двойной поляризацией ALOS-1, -2 PALSAR-1, -2 ([https://developers.google.com/earth-engine/datasets/catalog/JAXA\\_ALOS\\_PALSAR\\_YEARLY\\_SAR](https://developers.google.com/earth-engine/datasets/catalog/JAXA_ALOS_PALSAR_YEARLY_SAR)) был также рассчитан в GEE по формуле (Yadav et al., 2022):

$$RVI = \frac{4\gamma_{HH}^0}{\gamma_{HH}^0 + \gamma_{HV}^0},$$

где  $\gamma_{HH}^0$ ,  $\gamma_{HV}^0$  — нормализованная интенсивность обратного рассеяния (англ. gamma pought — гамма-ноль) на согласованной горизонтальной и кроссполяризации соответственно.

### Раздельная оценка степени лесовосстановления с использованием NDVI и RVI

На рис. 2а представлены временные ряды и тренды вегетационного индекса NDVI для контрольных участков и лесного подроста. Скорость роста NDVI на участке лесовосстановления в 3,05 и 5,74 раза больше скорости роста для зрелого смешанного и соснового леса соответственно. Оценка значимости и надёжности уравнений линейных трендов произведена с помощью статистического критерия Фишера – Снедекора. Условием значимости становится превышение расчётным значением критерия Фишера  $F_{расч} = \frac{r^2}{1-r^2}(n-2)$  ( $r$  — коэффициент корреляции,  $n$  — число измерений) критического значения  $F_{крит}(\alpha; df_1; df_2)$ , где  $\alpha$  — уровень значимости;  $df$  — степень свободы, число факторов уравнения регрессии:  $df_1 = 1$ ,  $df_2 = n - 2$ . Только на участке лесовосстановления подтверждается значимость и надёжность линейного тренда роста  $NDVI = 0,0234 + 0,0081t$  (где  $t$  — год от момента пожара) с коэффициентом корреляции  $r = 0,872$  при всех четырёх стандартных уровнях значимости  $\alpha = \{0,10; 0,05; 0,01; 0,001\}$ .

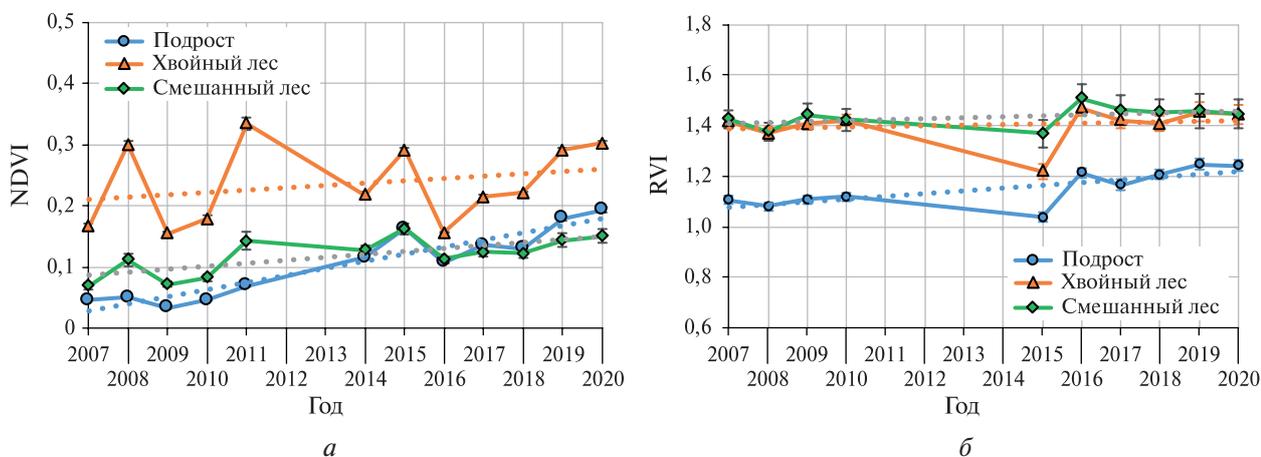


Рис. 2. Временные ряды с доверительными интервалами и тренды вегетационных индексов: а — NDVI зимнего периода по данным Landsat-5, -8, 2007–2020 гг.; б — RVI по данным ALOS-1, -2 PALSAR-1, -2, 2007–2020 гг.

Для смешанного леса уравнение линейного тренда  $NDVI = 0,0894 + 0,0026t$  и  $r = 0,553$  значимы при  $\alpha = \{0,10; 0,05\}$  и незначимы при понижении  $\alpha$  до  $0,01$ . Тренд для хвойного леса ( $r = 0,138$ ) незначим во всех случаях. Как видно на графике *рис. 2а*, линейные тренды NDVI участка лесовосстановления и контрольного смешанного леса пересеклись в 2016 г., т. е. далее наблюдается тенденция к восстановлению основной породы — сосны. Пересечение линейного тренда участка лесовосстановления с трендом для соснового леса прогнозируется, судя по *рис. 2а*, через 27 лет (в 2030 г.), что почти в два раза превышает аналогичные оценки роста соснового молодняка на равнинной местности дельты р. Селенги, полученные ранее в работе (Дмитриев и др., 2022б). Это связано прежде всего с различием природно-климатических факторов (плодородие и влажность почвы, температура воздуха, направление и сила ветра, рельеф) и начальных условий (залесение сельскохозяйственных полей/восстановление выгоревшего леса).

На *рис. 2б* представлены временные ряды и линейные тренды среднегодовых значений радарного вегетационного индекса RVI. По графикам *рис. 2б* видно, что на контрольных участках наблюдается незначительный положительный тренд, т. е. объёмная неоднородность леса (размеры и количество ветвей) увеличивается. Скорость ежегодного прироста неоднородностей леса на участке лесовосстановления в 3,67 и 2,20 раз выше, чем на участках хвойного и смешанного леса. Проверка с помощью статистического критерия Фишера–Снедекора показала, что условие значимости выполняется для линейного тренда роста молодняка  $RVI = 1,027 + 0,011t$  (где  $t$  — год от момента пожара) с коэффициентом корреляции  $r = 0,743$  при  $\alpha = \{0,10; 0,05\}$ . Условие выполняется для линейного тренда роста смешанного леса  $RVI = 1,38 + 0,005t$  с  $r = 0,594$  только при  $\alpha = 0,10$ . Для соснового леса тренд становится незначимым при всех уровнях значимости, т. е. объём надземной биомассы на данном контрольном участке леса можно считать стабильным на протяжении 13 лет радиолокационных измерений. Линейные тренды на *рис. 2б* показывают, что при сохранении скорости роста RVI уровень контрольного леса на участке лесовосстановления будет достигнут через 41 год после пожара. Последняя величина значительно отличается от прогноза по данным NDVI (27 лет), что связано с различием скорости восстановления проективного покрытия кронами деревьев и скорости увеличения геометрических размеров (суммарной биомассы) стволов и ветвей деревьев. Поэтому необходима комплексная оценка с совместным учётом этих факторов.

### Метод оценки степени лесовосстановления на плоскости NDVI – RVI

Анализ временной динамики вегетационных индексов предлагается выполнять совместно: на основе оценки закономерностей временных треков исследуемого и контрольных участков на двумерной плоскости NDVI–RVI (*рис. 3*, см. с. 170). Значения NDVI откладываются по оси абсцисс, RVI — по оси ординат. На графике заметны тенденции роста индексов и, следовательно, роста лесной растительности на исследуемом и контрольных лесных участках. Начало координат, или нулевые значения вегетационных индексов, соответствует случаю идеально гладкой поверхности без растительности. Наиболее близкой к данному состоянию становится точка в виде красного квадрата на *рис. 3*, соответствующая безлесному участку, а также точки временного трека исследуемого участка на начальной стадии роста молодняка (до 2010 г.). Значительное расстояние до начала координат этих точек при минимальном или полном отсутствии растительности обусловлено влиянием рельефа (крутизной склонов) и шероховатостью гористой местности.

На временном отрезке 2007–2010 гг. точки трека исследуемого участка группируются в небольшой зоне начальной стадии роста (4–7-й года после пожара). В среднем значения NDVI данного периода соответствуют значению для безлесного участка (точка «поле» на *рис. 3*), а индекс RVI больше на 0,136. Последнее, вероятно, связано с большей шероховатостью участка лесовосстановления и значительным влиянием рельефа (угол падения радиолокационного эхо-сигнала варьирует в пределах 25–50°).

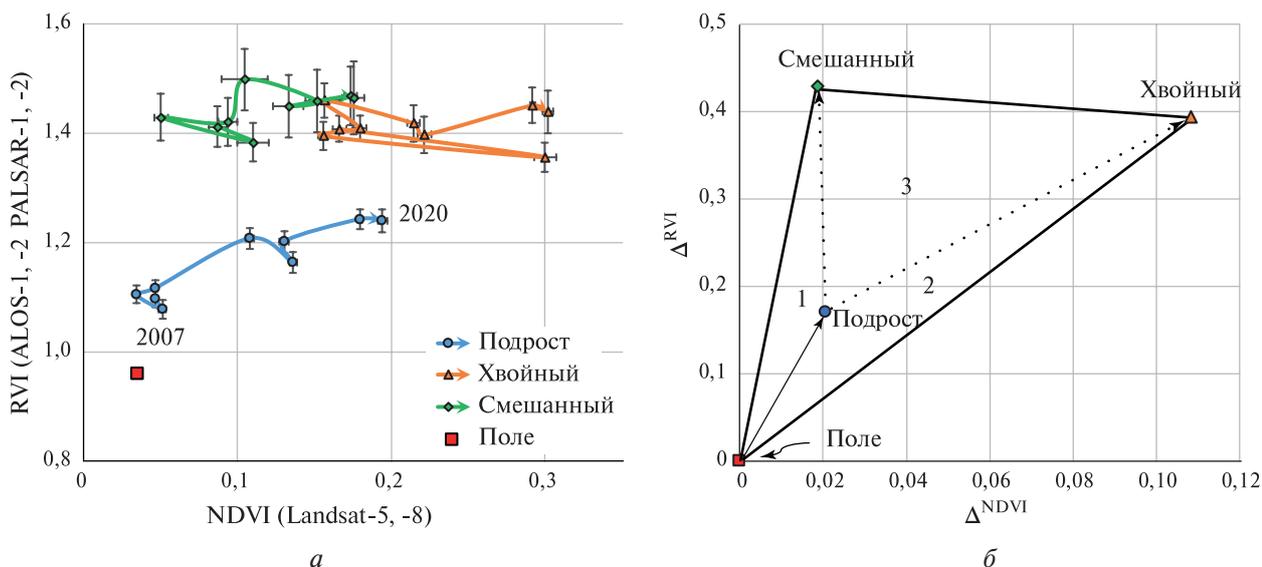


Рис. 3. Временные треки на плоскости NDVI – RVI участка лесовосстановления и контрольных участков по данным Landsat-5, -8 и ALOS-1, -2 PALSAR-1, -2 с 2007 по 2020 г. (а); усреднённая треугольная зона лесовосстановления за 2016–2020 гг. с переносом начала координат в точку «поле» (б)

Анализ рис. 3а показывает, что контрольные участки на плоскости NDVI – RVI формируют подвижную треугольную зону, внутри которой точки временного трека исследуемого участка по мере восстановления лесной растительности перемещаются от контрольного участка «поле» к контрольным участкам леса. На рис. 3б представлено усреднённое за пять лет (2016–2020) расположение исследуемого и контрольных участков. Начало координат перемещено в точку «поле», по осям абсцисс и ординат откладываются разности соответствующих вегетационных индексов:

$$\Delta_i^{NDVI} = NDVI_i - NDVI_{\text{поле}}, \quad \Delta_i^{RVI} = RVI_i - RVI_{\text{поле}},$$

где нижний индекс  $i$  подразумевает один из участков леса или лесного подроста. Положение точки «лесной подрост» внутри треугольной зоны характеризует усреднённое восстановление лесной растительности на 13–17-й годы или 15-й год после пожара. Вектор чёрного цвета от начала координат к точке «лесной подрост» показывает среднюю динамику за эти годы. Векторы, выделенные пунктиром, ограничивают зону будущего развития — к сосновому/смешанному лесу или промежуточному варианту.

Для количественной оценки степени лесовосстановления предлагается использовать соотношение длины векторов: на основе сравнения площадей малых треугольников 1, 2 и 3 и большого треугольника с вершинами в контрольных точках (см. рис. 3б). По мере восстановления леса площадь треугольника 3 будет уменьшаться, а суммарная площадь треугольников 1 и 2 должна увеличиваться. Введём количественный показатель степени лесовосстановления — индекс DRI (англ. Degree of Reforestation Index), равный отношению суммы площадей треугольников 1 и 2 к общей площади лесовосстановления  $S$ :

$$DRI = \frac{s_1 + s_2}{S} = \left(1 - \frac{s_3}{S}\right); \quad S = s_1 + s_2 + s_3,$$

где  $s_1, s_2, s_3$  — площадь малых треугольников 1, 2 и 3;  $S$  — площадь большой треугольной зоны. После пожара, при полном выгорании растительности,  $DRI \approx 0$ , а по завершении восстановления леса приближается к 1. Площадь треугольников на плоскости можно вычислить по формулам аналитической геометрии, зная координаты их вершин. Например, для треугольника 1 площадь определяется как значение определителя матрицы, составленной из координат его вершин:

$$s_1 = \mp \frac{1}{2} \begin{vmatrix} \Delta_{\text{смеш}}^{\text{NDVI}} & \Delta_{\text{смеш}}^{\text{RVI}} \\ \Delta_{\text{подрост}}^{\text{NDVI}} & \Delta_{\text{подрост}}^{\text{RVI}} \end{vmatrix}.$$

Положительный или отрицательный знак выбирается исходя из необходимости положительного значения площади.

Оценка восстановления или замещения породного состава может быть построена на основе соотношения площадей треугольников  $s_1$  и  $s_2$ . Чем больше в составе подростка сосны, тем больше будет  $s_1$  и меньше  $s_2$ . Для количественной оценки доли сосны (или другой основной породы) введём индекс RSI (англ. Ratio of Species Index), представляющий собой относительную площадь треугольника 1:

$$\text{RSI}_{\text{сосна}} = \frac{s_1}{s_1 + s_2}.$$

Индекс  $\text{RSI}_{\text{сосна}}$  на начальной стадии в большей степени характеризует долю территории, покрытой сосновым молодняком. Затем, при смыкании крон лесного подростка, этот показатель уже характеризует долю сосны в породном составе и варьируется от 0 при полном замещении основной породы лиственными до 1 при восстановлении полностью соснового леса. Для усреднённой ситуации за период 2016–2020 гг. на рис. 3б индексы DRI и  $\text{RSI}_{\text{сосна}}$  равны 0,29 и 0,35 соответственно.

Для мониторинга динамики лесовосстановления за весь период спутниковых наблюдений 2007–2020 гг. (с целью охвата всех точек временного трека) координаты вершин треугольной зоны были выбраны следующим образом: максимальные значения индексов контрольных участков смешанного и хвойного леса, начало координат — безлесный участок. На рис. 4 представлена полученная таким образом треугольная зона на плоскости  $\Delta^{\text{NDVI}} - \Delta^{\text{RVI}}$ . Как видно по рисунку, в первые 4–7 лет после пожара вегетационные индексы исследуемого участка ближе к характеристикам смешанного леса, но в последующие 12–17 лет отмечается смещение к характеристикам хвойного леса.

Расчёт индексов DRI и RSI позволил получить следующие данные по лесовосстановлению:

- 1) восстановление происходит со средней скоростью 1,45 % в год ( $r^2 = 0,63$ );
- 2) расчётное время достижения уровня контрольного соснового леса — 60 лет (при неизменной скорости роста);
- 3) восстановление проективного покрытия и породного состава происходит со средней скоростью 7,12 % в год ( $r^2 = 0,89$ ) и восстановление породного состава, идентичного контрольному участку соснового леса, будет достигнуто через 18 лет после пожара.

## Заключение

В работе предложен метод комплексной оценки состояния и динамики лесного подростка для качественной и количественной оценки степени общего восстановления и степени восстановления основной породы — сосны (или её замещения на лиственные породы). Суть метода заключается в исследовании временной динамики изменения нормализованного

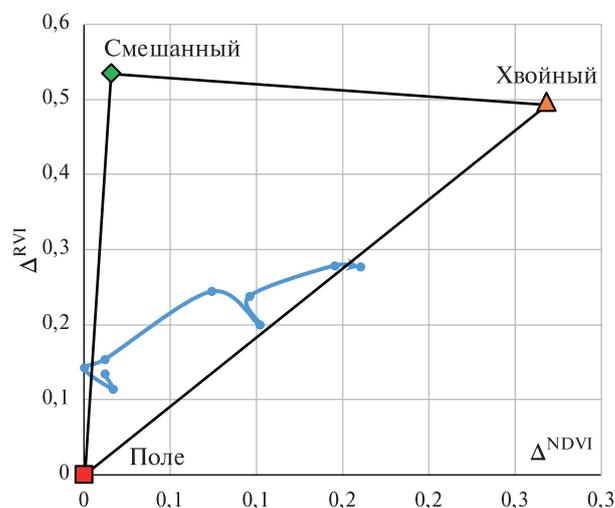


Рис. 4. Временной трек участка лесовосстановления на плоскости  $\Delta^{\text{NDVI}} - \Delta^{\text{RVI}}$

вегетационного индекса NDVI и радарного вегетационного индекса RVI участка лесовосстановления на плоскости NDVI – RVI. Для описания такой динамики введены два количественных индекса: DRI — показатель степени лесовосстановления и RSI — показатель степени восстановления основной породы.

На примере тестового участка в окрестностях г. Улан-Удэ (Республика Бурятия) за период 2007–2020 гг. по данным Landsat-5, -8 (индекс NDVI) и ALOS-1, -2 PALSAR-1, -2 (индекс RVI) для участка лесного подроста и трёх контрольных участков получены следующие результаты: индекс DRI растёт со скоростью 1,45 % в среднем за год ( $R^2 = 0,63$ ), индекс RSI увеличивается со средней скоростью 7,12 % в год ( $r^2 = 0,89$ ). Таким образом, восстановление породного состава, идентичного контрольному участку соснового леса, будет достигнуто через 18 лет после пожара, а получение показателей контрольного соснового леса (при неизменной скорости) прогнозируется через 60 лет. Последняя цифра в большей степени характеризует момент достижения порога насыщения по данным спутниковой радиолокации L-диапазона, после которого дистанционная оценка увеличения биомассы деревьев затруднительна, да и сама динамика биомассы леса будет уже меньшей. Более того, рассчитанное пороговое значение может быть использовано для разделения леса на молодой (с высокой динамикой прироста биомассы и с высоким поглощением углерода) и зрелый с меньшим приростом и поглощением.

Исследования выполнены при поддержке гранта Российского научного фонда № 22-27-20081.

## Литература

1. *Барталев С. А., Ворушилов И. И., Егоров В. А.* Построение и радиометрическая нормализация безоблачных композитных спутниковых изображений покрытой снегом земной поверхности для мониторинга лесов // *Современные проблемы дистанционного зондирования Земли из космоса*. 2022. Т. 19. № 2. С. 57–69. DOI: 10.21046/2070-7401-2022-19-2-57-69.
2. *Дмитриев А. В., Чимитдоржиев Т. Н., Дагуров П. Н.* (2022а) Оптико-микроволновая диагностика восстановления леса после пожаров // *Вычислительные технологии*. 2022. Т. 27. № 2. С. 105–121. DOI: 10.25743/ICT.2022.27.2.009.
3. *Дмитриев А. В., Чимитдоржиев Т. Н., Добрынин С. И., Худайбердиева О. А., Кирбижекова И. И.* (2022б) Оптико-микроволновая диагностика залесения сельскохозяйственных земель // *Современные проблемы дистанционного зондирования земли из космоса*. 2022. Т. 19. № 4. С. 168–180. DOI: 10.21046/2070-7401-2022-19-4-168-180.
4. *Родионова Н. В., Вахнина И. Л., Желибо Т. В.* Оценка динамики послепожарного состояния растительности на территории Ивано-Арахлейского природного парка (Забайкальский край) по радарным и оптическим данным спутников Sentinel 1/2 // *Исслед. Земли из космоса*. 2020. № 3. С. 14–25. DOI: 10.31857/S0205961420030045.
5. *Ховратович Т. С., Барталев С. А., Кашицкий А. Б.* Метод детектирования изменений лесов на основе подпиксельной оценки проективного покрытия древесного полога по разновременным спутниковым изображениям // *Современные проблемы дистанционного зондирования Земли из космоса*. 2019. Т. 16. № 4. С. 102–110. DOI: 10.21046/2070-7401-2019-16-4-102-110.
6. *Чимитдоржиев Т. Н., Ефременко В.* Об использовании различных индексов вегетации в дистанционном зондировании экосистем // *Исслед. Земли из космоса*. 1998. № 3. С. 49–56.
7. *Чимитдоржиев Т. Н., Дмитриев А. В., Кирбижекова И. И. и др.* Дистанционные оптико-микроволновые измерения параметров леса: современное состояние исследований и экспериментальная оценка возможностей // *Современные проблемы дистанционного зондирования Земли из космоса*. 2018. Т. 15. № 4. С. 9–26. DOI: 10.21046/2070-7401-2018-15-4-9-24.
8. *Banda F., Giudici D., Le Toan T. et al.* The BIOMASS Level2 Prototype Processor: Design and Experimental Results of Above-Ground Biomass Estimation // *Remote Sensing*. 2020. V. 12. No. 6. Article 985. DOI: 10.3390/rs12060985.
9. *Bellassen V., Luysaert S.* Carbon sequestration: Managing forests in uncertain times // *Nature*. 2014. V. 506. No. 7487. P. 153–155. DOI: 10.1038/506153a.
10. *Bondur V. G., Chimitdorzhiev T. N., Kirbizhekova I. I., Dmitriev A. V.* Estimation of Postfire Reforestation with SAR Polarimetry and NDVI Time Series // *Forests*. 2022. V. 13. No. 5. Article 814. DOI: 10.3390/f13050814.

11. Chazdon R. L., Broadbent E. N., Rozendaal D. M. A. et al. Carbon sequestration potential of second-growth forest regeneration in the Latin American tropics // *Science Advances*. 2016. V. 2. No. 5. Article e1501639. DOI: 10.1126/sciadv.1501639.
12. Dobson M. C., Ulaby F. T., Le Toan T. et al. Dependence of Radar Backscatter on Coniferous Forest Biomass // *IEEE Trans. Geoscience and Remote Sensing*. 1992. V. 30. No. 2. P. 412–415. DOI: 10.1109/36.134090.
13. Gorelick N., Hancher M., Dixon M. et al. Google Earth Engine: Planetary-scale geospatial analysis for everyone // *Remote Sensing of Environment*. 2017. V. 202. P. 18–27. DOI: 10.1016/j.rse.2017.06.031.
14. Jiang M., Medlyn B. E., Drake J. E. et al. The fate of carbon in a mature forest under carbon dioxide enrichment // *Nature*. 2020. V. 580. No. 7802. P. 227–231. DOI: 10.1038/s41586-020-2128-9.
15. Le Toan T., Beaudoin A., Riom J., Guyon D. Relating Forest Biomass to SAR Data // *IEEE Trans. Geoscience and Remote Sensing*. 1992. V. 30. No. 2. P. 403–411. DOI: 10.1109/36.134089.
16. Lehmann E. A., Caccetta P., Lowell K. et al. SAR and optical remote sensing: Assessment of complementarity and interoperability in the context of a large-scale operational forest monitoring system // *Remote Sensing of Environment*. 2015. V. 156. P. 335–348. DOI: 10.1016/j.rse.2014.09.034.
17. Pinnington E. M., Casella E., Dance S. L. et al. Understanding the effect of disturbance from selective felling on the carbon dynamics of a managed woodland by combining observations with model predictions // *J. Geophysical Research: Biogeosciences*. 2017. V. 122. No. 4. P. 886–902. DOI: 10.1002/2017JG003760.
18. Pugh T. A. M., Lindeskog M., Smith B. et al. Role of forest regrowth in global carbon sink dynamics // *Proc. National Academy of Sciences*. 2019. V. 116. No. 10. P. 4382–4387. DOI: 10.1073/pnas.1810512116.
19. Santoro M., Cartus O., Mermoz S. et al. GlobBiomass — global above-ground biomass and growing stock volume datasets. 2018. <https://doi.org/10.1594/PANGAEA.894711>.
20. Yadav V. P., Prasad R., Bala R. et al. Appraisal of Dual Polarimetric Radar Vegetation Index in First Order Microwave Scattering Algorithm Using Sentinel-1A (C-Band) and ALOS-2 (L-Band) SAR Data // *Geocarto Intern.* 2022. V. 37. P. 6232–6250. DOI: 10.1080/10106049.2021.1933209.
21. Yu Y., Saatchi S. Sensitivity of L-Band SAR Backscatter to Aboveground Biomass of Global Forests // *Remote Sensing*. 2016. V. 8. No. 6. Article 522. DOI: 10.3390/rs8060522.

## A method for reforestation monitoring based on joint analysis of optical-microwave data on the NDVI–RVI plane

I. I. Kirbizhekova, T. N. Chimitdorzhiev, A. V. Dmitriev

*Institute of Physical Materials Science SB RAS, Ulan-Ude 670047, Russia*  
E-mail: kirbizhekova@bk.ru

This paper proposes a method for comprehensive assessing of the state and dynamics of young forest growth through joint analysis of multispectral optical images and satellite radar data. Previous research showed that separate analysis of vegetation (using the NDVI index) and radar (using the RVI index) data produced significantly different forecasts of reforestation levels after a fire. Therefore, we propose evaluating the temporal dynamics of reforestation through the NDVI–RVI plane, comparing against control areas of coniferous and mixed forests and also a treeless area. We demonstrate that these areas create a movable triangular zone, where changes in vegetation indices indicate an increase in forest projective cover, aboveground biomass growth, and replacement/restoration of species. To describe such dynamics, we introduce two quantitative indices: the degree of reforestation index (DRI) and the ratio of species index (RSI). To process the data and scale the results, we used the modern functionality of the Google Earth Engine (GEE) cloud platform. We obtained NDVI values from Landsat-5, -8 data during the 2007–2020 winter (snow) period, minimizing the influence of soil and grass on assessing deciduous and evergreen coniferous plantations' crown dynamics. Additionally, we obtained the radar vegetation index RVI from synthetic aperture satellite radar (SAR) data of ALOS-1 PALSAR-1 (2006–2010) and ALOS-2 PALSAR-2 (2016–2020) with the help of the GEE cloud platform to study forest vegetation biomass changes.

**Keywords:** remote sensing, optical-microwave data, NDVI, RVI, time series, post-fire reforestation

Accepted: 04.07.2023

DOI: 10.21046/2070-7401-2023-20-4-165-174

## References

1. Bartalev S. A., Vorushilov I. I., Egorov V. A., Creation and radiometric normalisation of cloud-free composite satellite images of snow-covered terrestrial surface for forest monitoring, *Sovremennye problemy distantsionnogo zondirovaniya Zemli iz kosmosa*, 2022, Vol. 19, No. 2, pp. 57–69 (in Russian), DOI: 10.21046/2070-7401-2022-19-2-57-69.
2. Dmitriev A. V., Chimitdorzhiev T. N., Dagurov P. N. (2022a), Optics and microwave detection of forest restoration after fires, *Computational technologies*, 2022, Vol. 27, No. 2, pp. 105–121 (in Russian), DOI: 10.25743/ICT.2022.27.2.009.
3. Dmitriev A. V., Chimitdorzhiev T. N., Dobrynin S. I., Khudaiberdieva O. A., Kirbizhekova I. I. (2022b), Optical-microwave diagnostics of agricultural land afforestation, *Sovremennye problemy distantsionnogo zondirovaniya Zemli iz kosmosa*, 2022, Vol. 19, No. 4, pp. 168–180 (in Russian), DOI: 10.21046/2070-7401-2022-19-4-168-180.
4. Rodionova N. V., Vakhnina I. L., Zhelibo T. V., Assessment of the Dynamics of Postfire State of Vegetation in Territory Ivan-Arakhley Natural Park (Zabaikalsky Krai) Using Radar and Optical Sentinel 1/2 Data, *Issledovanie Zemli iz kosmosa*, 2020, No. 3, pp. 14–25 (in Russian), DOI: 10.31857/S0205961420030045.
5. Khovratovich T. S., Bartalev S. A., Kashnitskii A. V., Forest change detection based on sub-pixel estimation of crown cover density using bitemporal satellite data, *Sovremennye problemy distantsionnogo zondirovaniya Zemli iz kosmosa*, 2019, Vol. 16, No. 4, pp. 102–110 (in Russian), DOI: 10.21046/2070-7401-2019-16-4-102-110.
6. Chimitdorzhiev T. N., Efremenko V., On the use of various vegetation indices in remote sensing of ecosystems, *Issledovanie Zemli iz kosmosa*, 1998, No. 3, pp. 49–56 (in Russian).
7. Chimitdorzhiev T. N., Dmitriev A. V., Kirbizhekova I. I. et al., Remote optical-microwave measurements of forest parameters: modern state of research and experimental assessment of potentials, *Sovremennye problemy distantsionnogo zondirovaniya Zemli iz kosmosa*, 2018, Vol. 15, No. 4, pp. 9–24 (in Russian), DOI: 10.21046/2070-7401-2018-15-4-9-24.
8. Banda F., Giudici D., Le Toan T. et al., The BIOMASS Level 2 Prototype Processor: Design and Experimental Results of Above-Ground Biomass Estimation, *Remote Sensing*, 2020, Vol. 12, No. 6, Article 985, DOI: 10.3390/rs12060985.
9. Bellassen V., Luysaert S., Carbon sequestration: Managing forests in uncertain times, *Nature*, 2014, Vol. 506, No. 7487, pp. 153–155, DOI: 10.1038/506153a.
10. Bondur V. G., Chimitdorzhiev T. N., Kirbizhekova I. I., Dmitriev A. V., Estimation of Postfire Reforestation with SAR Polarimetry and NDVI Time Series, *Forests*, 2022, Vol. 13, No. 5, Article 814, DOI: 10.3390/f13050814.
11. Chazdon R. L., Broadbent E. N., Rozendaal D. M. A. et al., Carbon sequestration potential of second-growth forest regeneration in the Latin American tropics, *Science Advances*, 2016, Vol. 2, No. 5, p. e1501639, DOI: 10.1126/sciadv.1501639.
12. Dobson M. C., Ulaby F. T., Le Toan T. et al., Dependence of Radar Backscatter on Coniferous Forest Biomass, *IEEE Trans. Geoscience and Remote Sensing*, 1992, Vol. 30, No. 2, pp. 412–415, DOI: 10.1109/36.134090.
13. Gorelick N., Hancher M., Dixon M. et al., Google Earth Engine: Planetary-scale geospatial analysis for everyone, *Remote Sensing of Environment*, 2017, Vol. 202, pp. 18–27, DOI: 10.1016/j.rse.2017.06.031.
14. Jiang M., Medlyn B. E., Drake J. E. et al., The fate of carbon in a mature forest under carbon dioxide enrichment, *Nature*, 2020, Vol. 580, No. 7802, pp. 227–231, DOI: 10.1038/s41586-020-2128-9.
15. Le Toan T., Beaudoin A., Riom J., Guyon D., Relating Forest Biomass to SAR Data, *IEEE Trans. Geoscience and Remote Sensing*, 1992, Vol. 30, No. 2, pp. 403–411, DOI: 10.1109/36.134089.
16. Lehmann E. A., Caccetta P., Lowell K. et al., SAR and optical remote sensing: Assessment of complementarity and interoperability in the context of a large-scale operational forest monitoring system, *Remote Sensing of Environment*, 2015, Vol. 156, pp. 335–348, DOI: 10.1016/j.rse.2014.09.034.
17. Pinnington E. M., Casella E., Dance S. L. et al., Understanding the effect of disturbance from selective felling on the carbon dynamics of a managed woodland by combining observations with model predictions, *J. Geophysical Research: Biogeosciences*, 2017, Vol. 122, No. 4, pp. 886–902, DOI: 10.1002/2017JG003760.
18. Pugh T. A. M., Lindeskog M., Smith B. et al., Role of forest regrowth in global carbon sink dynamics, *Proc. National Academy of Sciences*, 2019, Vol. 116, No. 10, pp. 4382–4387, DOI: 10.1073/pnas.1810512116.
19. Santoro M., Cartus O., Mermoz S. et al., *GlobBiomass — global above-ground biomass and growing stock volume datasets*, 2018, <https://doi.org/10.1594/PANGAEA.894711>.
20. Yadav V. P., Prasad R., Bala R. et al., Appraisal of Dual Polarimetric Radar Vegetation Index in First Order Microwave Scattering Algorithm Using Sentinel-1A (C-Band) and ALOS-2 (L-Band) SAR Data, *Geocarto Intern.*, 2022, Vol. 37, pp. 6232–6250, DOI: 10.1080/10106049.2021.1933209.
21. Yu Y., Saatchi S., Sensitivity of L-Band SAR Backscatter to Aboveground Biomass of Global Forests, *Remote Sensing*, 2016, Vol. 8, No. 6, Article 522, DOI: 10.3390/rs08060522.