

Анализ возможности применения радарного индекса DpRVI для оценки лесовосстановления

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

Институт физического материаловедения СО РАН, Улан-Удэ, 670047, Россия
E-mail: dav@ipms.bsnet.ru

Представлены результаты анализа нерегулярных временных рядов радарного вегетационного индекса на основе данных с двойной поляризацией (DpRVI — *англ.* Dual polarimetric Radar Vegetation Index) для участка послепожарного лесовосстановления в гористой местности. Для сравнения в качестве эталонов начального состояния и полного лесовосстановления был использован участок без растительности (поле) и контрольные участки хвойного и смешанного леса. Значения индекса DpRVI, которые служат индикатором объёмного рассеяния радиолокационного сигнала почвенно-растительным покровом, были рассчитаны по данным радиолокаторов с синтезированной апертурой с двойной поляризацией PALSAR-1 (*англ.* Phased Array type L-band Synthetic Aperture Radar) спутника ALOS-1 (*англ.* Advanced Land Observing Satellite) (2007–2011) и PALSAR-2 ALOS-2 (2015–2019). Установлено, что сезонные вариации индекса DpRVI составляют 60–70 % от общего среднеквадратичного отклонения. Определены эмпирические среднесезонные и среднемесячные значения DpRVI для исследуемых участков за весь период наблюдений, а также отклонения сезонной компоненты S от этих средних значений за последние пять лет. Сезонные отклонения участка послепожарного лесовосстановления в 1,5–2 раза меньше таковых для контрольных участков леса и на такую же величину больше, чем для участка без растительности. Показано отсутствие значимых трендов разности DpRVI – S для участков контрольного леса за весь период наблюдений, что характеризует стабильность объёмного рассеяния и лесной биомассы. На участке подроста установлен значимый линейный тренд роста разности DpRVI – S с коэффициентом корреляции 0,50, что свидетельствует об успешном процессе послепожарного лесовосстановления. Показано, что на основе соотношения индексов DpRVI подроста, контрольного леса и участка без растительности можно получить оценку относительной биомассы с коррекцией влияния рельефа гористой местности, эффекта «насыщения» отражённого радиолокационного сигнала, сезонной неравномерности радиолокационных поляриметрических измерений PALSAR-1/2 ALOS-1/2. Предложенные методы коррекции могут понизить относительную ошибку спутникового определения биомассы лесного подроста до величины, соответствующей наземным измерениям высоты и биомассы лесного подроста и контрольного леса. В целом результаты сравнительного анализа показали, что послепожарный рост DpRVI и, соответственно, биомассы лесного подроста происходит со скоростью 0,57 %/год (полагая за 100 % DpRVI хвойного леса), а прогнозируемое время полного лесовосстановления составляет порядка 60–90 лет. Результаты исследования показали высокую чувствительность и перспективность применения радиолокационных данных L-диапазона с двойной поляризацией для оценки и долгосрочного мониторинга процессов послепожарного восстановления лесной растительности даже в условиях гористой местности и нерегулярных разреженных данных.

Ключевые слова: дистанционное зондирование, лесной подрост, PALSAR-1/2 ALOS-1/2, DpRVI, сезонные изменения, тренд

Одобрена к печати: 09.09.2024
DOI: 10.21046/2070-7401-2024-21-5-173-187

Введение

В настоящее время доступ к спутниковым радиолокационным зарубежным данным значительно ограничен в силу их двойного назначения и других причин, особенно для территории России. В отличие от оптического и теплового диапазонов, где съёмка проводится регулярно в течение нескольких десятилетий, а в последнее время фактически ежедневно, в радиодиапазоне сетка данных до сих пор является разреженной в пространстве и времени. В частности, по Байкальскому региону в дециметровом диапазоне длин волн с глубиной проникновения радиолокационного импульса в лесную среду, достаточной для оценки и мониторинга

высоты, биомассы растительности и других характеристик (Чимитдоржиев и др., 2018), количество сеансов поляриметрической съёмки с двойной поляризацией PALSAR-1 (*англ.* Phased Array type L-band Synthetic Aperture Radar) спутника ALOS-1 (*англ.* Advanced Land Observing Satellite) не превышает двух-трёх десятков, а с полной поляризацией не превышает двух-трёх за весь период функционирования данных радиолокаторов с синтезированной апертурой (РСА) или отсутствует.

В работе (Jung et al., 2023) представлена глобальная карта пространственного распределения процесса естественного лесовосстановления и участков управляемых лесов на основе данных трёх различных источников дистанционного зондирования и показаны их достаточно существенные различия. В связи с глобальными климатическими изменениями, ростом числа и площади лесных пожаров, увеличением рисков экономического ущерба и негативных последствий актуально создание достоверного метода дистанционной оценки лесовозобновления после вырубок и пожаров и залесения бывших сельскохозяйственных земель.

В отличие от оптического диапазона, где временные изменения спектральных характеристик растительного покрова в основном характеризуют динамику проективного покрытия, временные изменения отражательных и рассеивающих свойств более перспективны для оценки и мониторинга роста лесной растительности в трёх пространственных измерениях благодаря более высокой проникающей способности радиоволн сантиметрового и дециметрового диапазона. Методы исследования лесовосстановления в радиодиапазоне в настоящее время только развиваются и в России представлены в основном работами авторского коллектива настоящей статьи (Дмитриев и др., 2022а, б; Родионова и др., 2020; Bondur et al., 2022). На ранних стадиях идентификация естественного восстановления леса затруднительна, поскольку низкорослые молодые лиственные деревья и редкие хвойные соизмеримы с густой травой и кустарником. В работах (Дмитриев и др., 2022а, 2023) на основе поляриметрических данных РСА ALOS-2 PALSAR-2 дециметрового (L-диапазон) и Sentinel-1 сантиметрового (С-диапазон) диапазонов длин электромагнитных волн исследованы изменения объёмного, поверхностного и уголкового механизма рассеяния, а также интенсивности обратного радарного рассеяния и интерферометрической когерентности на различных поляриметрических комбинациях и в различных диапазонах. Показано, что при помощи модельных разложений полностью поляриметрических данных РСА PALSAR-2 ALOS-2 можно проследить рост степени объёмной неоднородности молодого лесного подроста, в отличие от данных с двойной поляризацией. Также установлена возможность выявления динамики объёмной неоднородности (лесного подроста) при помощи временных рядов обратного радарного рассеяния данных зимнего периода Sentinel-1 на согласованной вертикальной поляризации.

Комбинирование радарных поляриметрических изображений с информацией оптических сенсоров позволяет разделить выявленный лесной подрост по породному составу и устранить ошибки классификации на безлесных участках. Так, в работах (Кирбижекова и др., 2023; Bondur et al., 2022, 2024; Kirbizhekova et al., 2021, 2023) предложен метод дистанционной оценки лесовосстановления/залесения сгоревшего участка бореального леса на основе комбинирования временных рядов индексов NDVI (*англ.* Normalized Difference Vegetation Index) и NBR (*англ.* Normalized Burn Ratio) зимнего периода по данным Landsat-5, -8, характеризующих вечнозелёную лесную растительность, и радарного индекса RVI (*англ.* Radar Vegetation Index) по данным ежегодной мозаики изображений радиолокаторов L-диапазона PALSAR-1/2 ALOS-1/2, характеризующих объёмное рассеяние. Показано, что временные треки контрольных участков зрелого соснового и смешанного леса, а также безлесной территории на плоскостях NDVI – RVI и NBR – RVI образуют подвижную треугольную зону, внутри которой можно следить за эволюцией участка лесовосстановления. На основе такого рассмотрения предложены количественные показатели оценки степени общего лесовосстановления, восстановления проективного покрытия и породного состава.

В работе (Mandal et al., 2020) был предложен радарный вегетационный индекс DpRVI, полученный на основе данных РСА Sentinel-1 (длина волны 5,6 см) с двойной поляризацией VV-VH (излучение вертикально поляризованного сигнала V и одновременный приём как горизонтальной H, так и вертикальной составляющей радиолокационного отклика). Предло-

женный индекс показал более высокую чувствительность и более сильную корреляцию с биофизическими параметрами сельскохозяйственной растительности по сравнению с четырьмя часто используемыми индикаторами: 1) радарным вегетационным индексом $RVI = 4\sigma_{VH}^0 / (\sigma_{VH}^0 + \sigma_{VV}^0)$, где σ_{VH}^0 и σ_{VV}^0 — коэффициенты обратного рассеяния на кросс- и согласованной поляризации соответственно; 2) поляриметрическим радарным вегетационным индексом PRVI (*англ.* Polarimetric Radar Vegetation Index); 3) двухполяризационным вегетационным индексом DPSVI (*англ.* Dual Polarization SAR Vegetation Index) и 4) отношением коэффициентов обратного рассеяния на поперечной и согласованной поляризации $\sigma_{VH}^0 / \sigma_{VV}^0$. Можно предполагать аналогичные возможности оценки и мониторинга роста лесной растительности, высота и биомасса которой на порядок выше аналогичных характеристик сельскохозяйственных культур, с помощью такого же индекса DpRVI, но только уже в дециметровом диапазоне длин волн (24 см) и на более продолжительных интервалах времени (десятки лет).

Цель данной работы заключается в оценке долговременных и сезонных изменений вегетативного состояния соснового молодняка в процессе послепожарного восстановления в сравнении с аналогичными изменениями контрольных участков зрелого соснового и смешанного леса и открытого участка без растительности. Исследования выполнены на основе нерегулярных временных рядов радиолокационных поляриметрических данных PALSAR-1/2 ALOS-1/2 дециметрового диапазона. В качестве индикатора используется радарный вегетационный индекс для данных с двойной поляризацией DpRVI, чувствительный к росту растительности (Карпов и др., 2019).

Территория исследования

Территория исследования расположена в окрестностях г. Улан-Удэ, в предгорьях хребта Улан-Бургасы, географические координаты: 107,64° с.ш., 51,90° в.д. (*рис. 1*). Максимальная высота гористой местности порядка 800 м над уровнем моря, но превышение высоты над уровнем долин рек Селенга и Уда менее 300 м. Климат данной местности резко континентальный, засушливый. В течение периода исследования среднемесячная температура варьировалась от $-22,8 \pm 2,3$ °C в январе до $+21,0 \pm 1,2$ °C в июле, согласно архивным климатическим данным метеостанции г. Улан-Удэ (<http://www.pogodaiklimat.ru/climate/30823.htm>). Суммарное количество осадков варьировалось от 149 до 318 мм/год, среднегодовое значение составило 220 ± 52 мм/год.

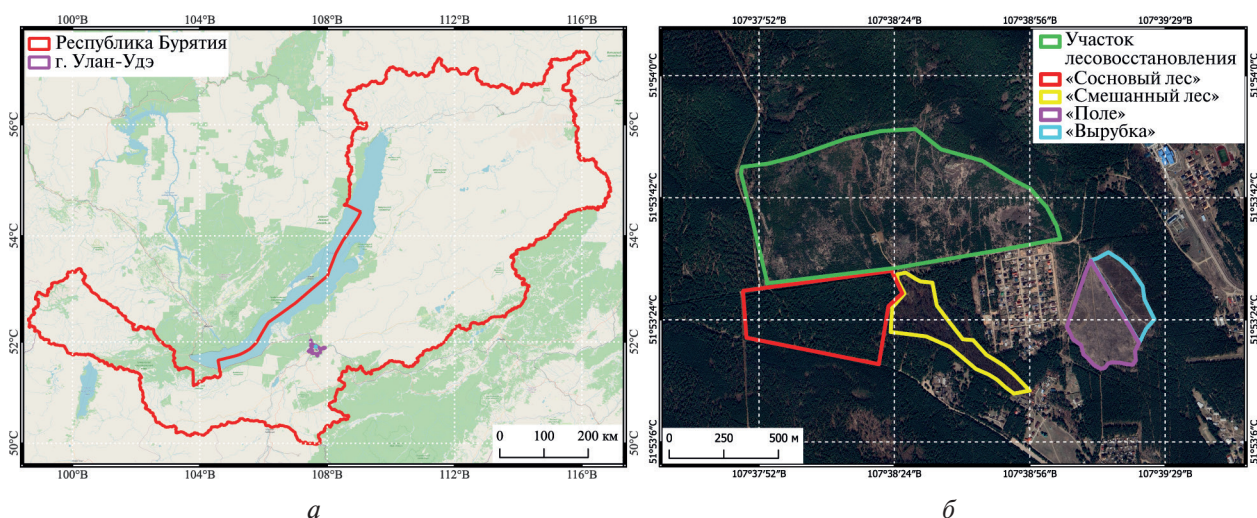


Рис. 1. Местоположение территории исследования (а), схема расположения тестовых участков (б)

Горные склоны и их подножия покрыты преимущественно хвойными лесами, в основном сосновыми. Также встречаются осина, берёза, лиственница, ели и др. Высокая пожароопасность, повышение среднегодовой температуры и усиление засушливости с начала XXI в. привели к увеличению частоты и площади лесных пожаров. Локальная оценка последствий лесных пожаров за 2001–2022 гг. показала потери леса на ~22 % территории, а прирост только на ~3,5 % (<https://www.globalforestwatch.org/>).

Весной 2003 г. на данной территории в результате пожара полностью выгорел лес на площади 69 га. Позднее, в 2004–2006 гг., в низинах и на пологих склонах были проведены лесовосстановительные мероприятия и высажены 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*). На данном участке до пожара произрастал сосновый лес. Его спектральные характеристики, вегетационные индексы, их долговременные и сезонные изменения по данным Landsat-5 были аналогичны характеристиками контрольного соснового леса. В настоящий момент возраст молодого подростка варьируется от 1 до 19 лет, высота не превышает 4 м. В качестве тестовых были выбраны два лесных участка, обозначенные на *рис. 1б* как «Сосновый лес» и «Смешанный лес» (контуров красного и жёлтого цвета соответственно). Они не были затронуты лесным пожаром и антропогенной деятельностью. Тестовый участок соснового леса однороден по составу с редкими вкраплениями берёзы на прогалинах. Высота деревьев варьируется от 18 до 23 м. Смешанный лес обладает следующим породным составом: лиственница — 65 %, берёза — 32 %, сосна — 3 %. Открытый безлесный участок выделен на *рис. 1б* контуром сиреневого цвета и обозначен «Поле», а участок «Вырубка» — контуром бирюзового цвета. Площади участков и размеры в пикселях приведены в *табл. 1*.

Таблица 1. Характеристики тестовых участков

	Тестовые участки				
	«Поле»	«Подрост»	«Вырубка»	«Сосновый лес»	«Смешанный лес»
Площадь, га	14	69	5	21	9
Размеры, пиксель	223	1100	81	339	139

Методика обработки спутниковых данных и результаты

В работах (Дмитриев и др., 2022б; Чимитдоржиев и др., 2018; Bondur et al., 2022; Kirbizhekova et al., 2021) показаны возможности применения радарного вегетационного индекса RVI для оценки и мониторинга лесного подростка на ранних стадиях послепожарного лесовосстановления. В настоящей работе возможности оценки и мониторинга роста лесной растительности исследуются с помощью DpRVI в дециметровом диапазоне длин волн (24 см).

Индекс DpRVI для оценки величины объёмного рассеяния радиолокационного импульса от лесной растительности использует степень поляризации m ($0 \leq m \leq 1$) и меру доминирования в механизме рассеяния β ($0 \leq \beta \leq 1$) по следующим формулам (Mandal et al., 2020):

$$DpRVI = 1 - m\beta, \quad m = \sqrt{1 - \frac{4\det(C_2)}{(Tr(C_2))^2}}, \quad \beta = \frac{\lambda_1}{\lambda_1 + \lambda_2},$$

где C_2 — ковариационная матрица размером 2×2 для матрицы рассеяния радиолокационного отклика; $\det(\dots)$ и $Tr(\dots)$ — определитель и сумма элементов главной диагонали (след) матрицы C_2 , а $\lambda_1 \geq \lambda_2 \geq 0$ её собственные значения. Индекс DpRVI принимает значения в диапазоне от 0 до 1. В случае идеально гладкой и ровной поверхности индекс зависит от высоты, полноты и сложности структуры растительного покрова и увеличивается по мере его роста. Более высокая чувствительность в оценке роста растительности обеспечивается более пол-

ным использованием поляриметрической информации в отличие от традиционных индексов, где применяются комбинации интенсивности разных каналов поляризации. Для расчёта индекса использовалась программа ESA (англ. European Space Agency) SNAP v8.0 (англ. Sentinel Application Platform) (<http://step.esa.int/main/toolboxes/snap/>).

Для каждого полигона по данным дециметрового диапазона PALSAR-1 ALOS-1 с двойной поляризацией HH-HV за 2007–2010 гг. и PALSAR-2 ALOS-2 за 2015–2019 гг. были рассчитаны усреднённые по территории значения радарных вегетационных индексов DpRVI. На *рис. 2а* представлены временные ряды DpRVI для участков. На приведённых графиках заметна малочисленность (количество сеансов радиолокационных съёмок $n = 29$), неравномерность и нерегулярность данных. Из-за преобладания летних более высоких значений PALSAR-1 ALOS-1 в период до 2010 г. (гистограмма зелёного цвета на *рис. 2б*) и зимних низких значений PALSAR-2 ALOS-2 после 2015 г. (гистограмма синего цвета на *рис. 2б*) наблюдаются ложные отрицательные тренды (прямые пунктирные линии на *рис. 2а*).

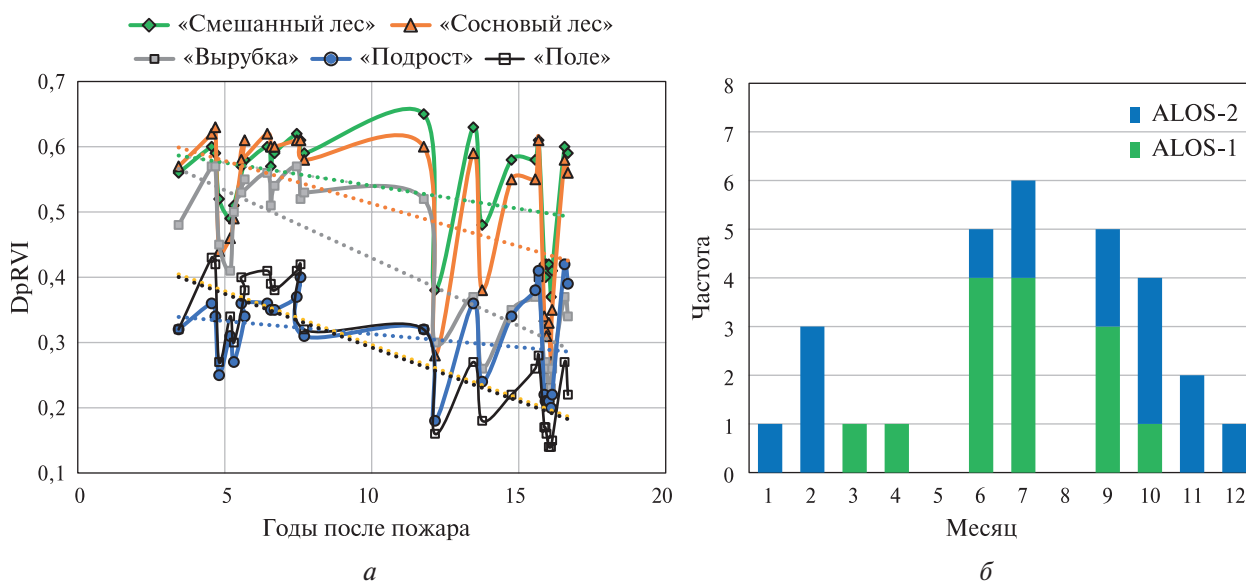


Рис. 2. Временные ряды радарного вегетационного индекса с двойной поляризацией DpRVI для тестовых участков (*а*); гистограмма распределения сеансов съёмки PALSAR-1/2 ALOS-1/2 (*б*)

Как видно по графикам на *рис. 2а*, значения DpRVI для пяти исследуемых участков зависят от сезонного фактора и наличия растительности. Минимумы временных треков соответствуют зимнему периоду наблюдений, максимумы — летнему. Наименьшие значения наблюдаются в отсутствие растительности (участок трека «поле» на 12–17 гг. после пожара), наибольшие — для участка контрольного смешанного леса. Вследствие успешного лесовосстановления, даже несмотря на искажающее влияние сезонного фактора, наблюдается тенденция сближения трендов DpRVI участка подроста и контрольного соснового леса за рассматриваемый период (2007–2019). Линейный тренд роста отношения индексов имеет вид:

$$\frac{DpRVI_{\text{подрост}}}{DpRVI_{\text{сосна}}} = 0,543 + 0,0082t,$$

где t — год после пожара ($t = 0$ в 2003 г., коэффициент детерминации $R^2 = 0,49$). В отсутствие растительности, судя по графику контрольного участка поля после 2015 г. (см. *рис. 2а*), индекс DpRVI (объёмное рассеяние) отличен от нуля из-за рельефа и шероховатости поверхности и также испытывает сезонные изменения.

Для анализа послепожарной динамики и долговременных тенденций представим временной ряд $DpRVI(t)$ аддитивной моделью следующего вида:

$$DpRVI(t) = Trend(t) + S + E,$$

где $Trend(t)$ — долговременный тренд; S — сезонная компонента; E — случайная составляющая (Саженова и др., 2020). Из-за неравномерного распределения данных обработку временного ряда произведём по следующему алгоритму:

- определение кусочно-неравноточной сезонной компоненты S ;
- расчёт тренда линейного вида для разности $DpRVI(t) - S = Trend(t) + E = a + bt + E$ (a и b параметры линейного уравнения регрессии);
- анализ остатков $E = DpRVI(t) - S - Trend(t)$ на случайность.

Для определения сезонной компоненты S в условиях малочисленных нерегулярных данных проведём группировку данных DpRVI по месяцам и рассчитаем эмпирические среднемесячные значения $DpRVI(m)$, где m — номер месяца, $m = 1, \dots, 12$. При наличии нескольких наблюдений это средние значения (в группах 2, 6, 7, 9, 10, 11). Несмотря на малонаселённость групп, можно сделать вывод, что разброс значений DpRVI в октябре ($m = 10$) или в период перехода через нулевую отметку температуры и становления снежного покровакратно превышает разброс значений в летнее и зимнее время. В группах 1, 3, 4 и 12 с одиночными данными среднегрупповые DpRVI(m) будут представлены, соответственно, этим единственным значением. В группах 5 и 8 отсутствующие данные замещаются средним арифметическим значением двух соседних групп:

$$DpRVI(m) = \frac{1}{2}[DpRVI(m-1) + DpRVI(m+1)].$$

На *рис. 3а* для иллюстрации алгоритма вычислений представлены сгруппированные исходные DpRVI (сплошные линии) и среднемесячные DpRVI(m) (пунктирные линии) для участков подроста и соснового леса. На *рис. 3б* для сравнения сезонной изменчивости DpRVI контрольных участков и участков роста и деградации лесной растительности представлены графики полиномиальной аппроксимации со степенью $k = 4$ по данным за пять лет (2015–2019). Коэффициенты детерминации R^2 при $k = 4$ достигают максимальных значений 0,81–0,92 и при дальнейшем увеличении k не изменяются. На участке лесовосстановления (кривая синего цвета) сезонные вариации объёмного рассеяния лесным подростом ближе к аналогичному ходу открытого участка (кривая чёрного цвета), чем эталонного соснового леса (кривая оранжевого цвета). Также на *рис. 3б* можно наблюдать сезонный характер влияния породного состава на DpRVI контрольного леса (кривые зелёного и оранжевого леса). В летний период различия минимальны, в зимний оникратно возрастают.

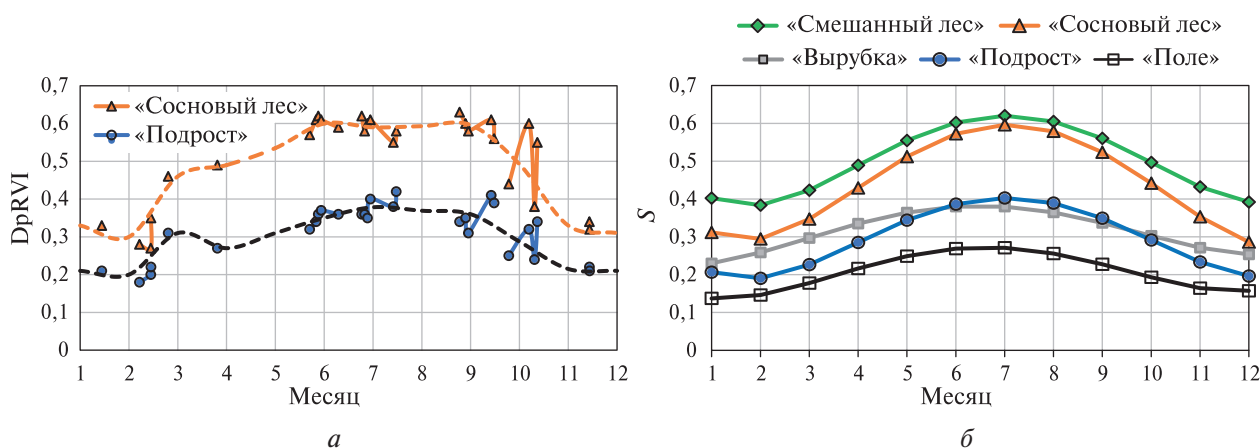


Рис. 3. Сгруппированные по месяцам DpRVI и эмпирические среднемесячные значения для подроста и соснового леса за 2007–2019 гг. (а); полиномиальная аппроксимация сезонного хода DpRVI для пяти тестовых участков за 2015–2019 гг. (б)

В табл. 2 представлены усреднённые по месяцам значения DpRVI и их среднеквадратичная ошибка (СКО) за пять последних лет и за весь период наблюдения, а также полиномиально аппроксимированные (степень полинома $k = 4$) сезонные компоненты S тестовых участков. Тестовые участки расположены в соответствии с возрастанием средних величин DpRVI или объёмного рассеяния. Полагая равным вклад рельефа в DpRVI всех участков, можно считать, что этот порядок соответствует возрастанию общей биомассы растительности на участках. Тот же порядок наблюдается в показателях рассеяния, таких как СКО, S , амплитуда сезонных вариаций, за исключением контрольных участков леса различного породного состава. Наибольшие сезонные вариации характерны для контрольного соснового леса. Если принять его статистические показатели в качестве эталона (100 %), то показатели участка без растительности принимают значения $\approx 30\text{--}50\%$, подроста и вырубки — $\approx 60\text{--}70\%$. Для смешанного леса среднее значение 114 %, а характеристики рассеяния — $\approx 70\text{--}80\%$. Разница статистических характеристик за разные периоды обусловлена отчасти временными изменениями, отчасти преобладанием до 2015 г. летних сеансов радиолокационных съёмок с более высокими значениями DpRVI. Если рассматривать данные за весь период, то наибольшие отличия лесного подроста от контрольных участков наблюдаются в осенне-зимний период. Сезонный разброс значений на участках подроста, поля и вырубки составляет порядка 60 % от значений СКО соответствующих DpRVI; на участках контрольного леса — 70 %. То есть вклад в сезонные вариации DpRVI непосредственно от лесной растительности не превышает 10 %. Величины S участка послепожарного лесовосстановления в 1,5–2 раза меньше таковых для контрольных участков леса, и в 1,5–2 раза больше, чем для участка без растительности.

Таблица 2. Статистические характеристики и сезонные компоненты радарного вегетационного индекса DpRVI по данным с двойной поляризацией

	Тестовые участки				
	«Поле»	«Подрост»	«Вырубка»	«Сосновый лес»	«Смешанный лес»
<i>Среднемесячные значения DpRVI±СКО, $\times 10^{-3}$</i>					
За пять лет (2015–2019)	199±52	285±91	305±59	430±132	492±99
За весь период (2007–2019)	286±99	310±72	417±121	505±124	536±86
<i>Полиномиальная ($k = 4$) аппроксимация сезонной компоненты S за пять лет, $\times 10^{-3}$</i>					
Январь	–62	–78	–75	–118	–90
Февраль	–53	–94	–46	–136	–109
Март	–21	–59	–8	–83	–69
Апрель	17	0	30	–1	–3
Май	50	59	59	82	63
Июнь	69	102	75	142	110
Июль	72	118	75	166	128
Август	57	104	60	149	11
Сентябрь	28	64	32	94	68
Октябрь	–6	7	–2	12	4
Ноябрь	–35	–52	–34	–77	–60
Декабрь	–42	–89	–51	–144	–100

Далее, согласно известному алгоритму определения тренда:

- сформируем временной ряд разницы исходных данных и сезонной компоненты $DpRVI(t) - S = Trend(t) + E$;
- находим методом наименьших квадратов параметры линейного уравнения регрессии $Trend(t) = a + bt$.

В табл. 3 для каждого участка представлены уравнения линейного тренда для разности $DpRVI(t) - S$, коэффициенты корреляции R , расчётные ($F_{расч}$) и критические ($F_{крит}$) значения критерия Фишера за весь период наблюдений. Для сравнения также представлены коэффициенты корреляции за пятилетний период после 2015 г. В последней строке таблицы приведены критические значения критерия Фишера $F_{крит}(\alpha, df_1, df_2)$ для двух стандартных уровней значимости α и степени свободы df (англ. degree of freedom), соответствующих количеству независимых переменных линейного уравнения ($df_1 = 1$) и числу наблюдений n ($df_2 = n - 2$).

Таблица 3. Линейные тренды радарного вегетационного индекса DpRVI по данным с двойной поляризацией

	Тестовые участки				
	«Поле»	«Подрост»	«Вырубка»	«Сосновый лес»	«Смешанный лес»
<i>Тренд линейного вида $y = a + bt$ ($y = DpRVI - S$, t — год после пожара 2003 г.)</i>					
Уравнение	$y = -0,0061t + 0,3228$	$y = 0,0027t + 0,2603$	$y = -0,0092t + 0,4944$	$y = -0,0006t + 0,475$	$y = -0,0006t + 0,4974$
Коэффициент корреляции R	-0,596	0,500	-0,622	0,073	0,200
Коэффициент корреляции R после 2015 г.	-0,086	0,458	-0,020	0,194	0,194
$F_{расч}$	14,880	8,980	17,030	0,700	1,010
$F_{крит}$	2,90 и 4,21 при $\alpha = 0,10$ и $0,05$; $df_1 = 1$, $df_2 = n - 2 = 27$				

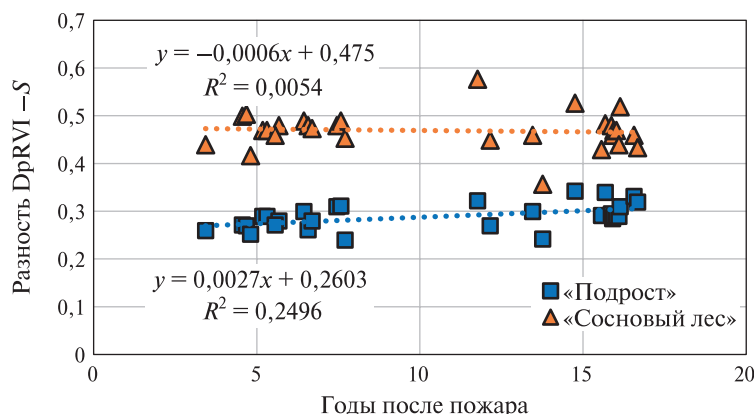


Рис. 4. Разность $DpRVI - S$ и линейный тренд $Trend(t)$ для участка лесовосстановления и соснового леса.

Как видно по табличным данным, тенденции роста и уменьшения $DpRVI$ на участках «Подрост», «Поле» и «Вырубка» статистически значимы ($F_{расч} > F_{крит}$) при стандартных уровнях значимости α , равных 0,10 и 0,05, что подтверждает соответствующие изменения объёмного рассеяния, обусловленные ростом или деградацией лесной растительности. Долговременные изменения $DpRVI$ соснового и смешанного леса статически незначимы ($F_{расч} < F_{крит}$), что свидетельствует о стабильности биомассы контрольного леса на интервале 2007–2019 гг. Как видно по коэффициентам корреляции, после 2015 г. на всех участках, кроме участка «Подрост», динамика $DpRVI(t) - S$ стабилизируется. На рис. 4 для сравнения представлена разность $DpRVI(t) - S$ и линейные тренды $Trend(t)$ для соснового леса и лесного подроста. Полагая уровень соснового леса эталонным, $DpRVI_{сосна}$ в пределах 0,430–0,505 (100 %), скорость роста $DpRVI$ лесного подроста (прирост биомассы) составляет 0,0027/год (0,53–0,63 %/год). А время достижения эталонного уровня на участке послепожар-

ного восстановления соснового леса по данным DpRVI составит $T \approx 60-90$ лет (из равенства $0,0027T + 0,2603 = 0,430$ или $0,505$), что в два раза превышает аналогичную оценку в 40 лет, полученную ранее (Кирбижекова и др., 2023) с помощью радарного вегетационного индекса RVI на основе данных PALSAR-1/2 ALOS-1/2. Эта оценка более соответствует возрасту зрелости сосны для Байкальского региона (100 лет и более), а также подтверждает более высокую чувствительность индекса DpRVI к росту лесной растительности.

Из-за малочисленности, неравномерности, неравноточности данных PALSAR-1/2 ALOS-1/2 среднеарифметические значения DpRVI являются смещёнными оценками математического ожидания. Величины смещения для исследуемых объектов различаются вследствие неодинакового влияния сезонного фактора на открытые участки без растительности, лесной подрост, леса разного породного состава. Для оценки смещения определим средневзвешенные значения, являющиеся более точными оценками средних значений. Рассмотрим три сезонные группы: зимнюю (количество зимних сеансов съёмки $n_1 = 8$), летнюю (количество летних сеансов съёмки $n_2 = 11$) и весенне-осеннюю (количество весенне-осенних сеансов съёмки $n_3 = 10$), которые содержат сравнимое количество данных. В этом случае точность определения среднесезонных значений и их разброс сравнимы. Веса и средневзвешенные значения рассчитаем по следующим формулам:

$$DpRVI_{\text{взвеш}} = \sum_{i=1}^3 \omega_i \cdot \text{mean}(DpRVI)_i, \quad \omega_i = \frac{1/\sigma_i^2}{\sum_{k=1}^3 1/\sigma_k^2},$$

где $\text{mean}(DpRVI)_i$ — среднесезонные значения (индексы $i = 1, 2, 3$ соответствуют зимнему, летнему и весенне-осеннему сезону); ω_i — вес среднесезонных значений; σ_i — сезонное среднеквадратичное отклонение DpRVI.

В табл. 4 и на рис. 5 приведены накопленные гистограммы среднесезонных значений и их доверительных интервалов (ДИ) при доверительной вероятности 0,95. Участки ранжированы в порядке возрастания накопленного значения DpRVI: 1 — «Поле», 2 — «Подрост», 3 — «Вырубка», 4 — «Сосновый лес», 5 — «Смешанный лес». По высоте столбца участка лесовосстановления можно сделать вывод о большей степени близости к контрольному открытому участку без растительности, чем к контрольным участкам леса. Отличия от участка «Поле» проявляются в более высоких вариациях в зимний период и меньших в летний (см. ДИ_зима и ДИ_лето на рис. 5). Это отличие также подтверждается при расчёте взвешенных средних значений DpRVI (кривая чёрного цвета на рис. 5), где вес сезонных значений обратно пропорционален величине разброса среднеквадратичного отклонения.

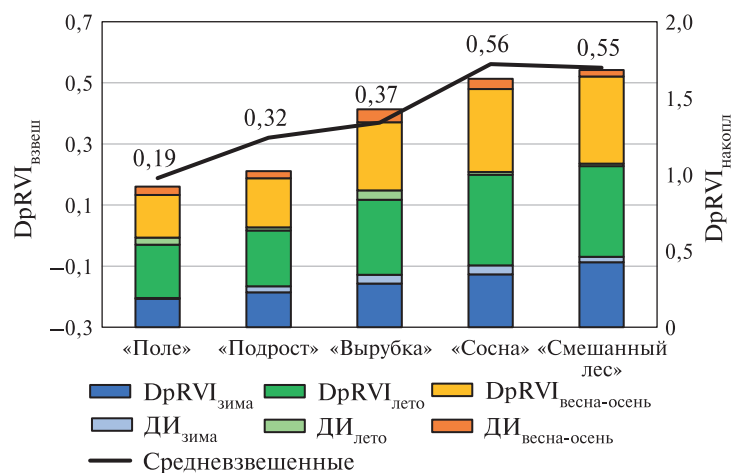


Рис. 5. Средневзвешенные значения DpRVI и гистограмма с накоплением

Таблица 4. Статистические характеристики, сезонные компоненты и тренды радарного вегетационного индекса DpRVI по данным с двойной поляризацией

	Тестовые участки				
	«Поле»	«Подрост»	«Вырубка»	«Сосновый лес»	«Смешанный лес»
<i>Среднесезонные значения DpRVI, $\times 10^{-3}$</i>					
Зима	186	229	286	346	425
Лето	349	365	491	595	593
Весна-осень	278	322	446	544	571
<i>Сезонное СКО, $\times 10^{-4}$</i>					
Зима	58	385	580	585	362
Лето	616	273	822	225	224
Весна-осень	686	563	1037	818	515
<i>Вес, $\times 10^{-3}$</i>					
Зима	984	289	552	121	243
Лето	9	575	275	817	636
Весна-осень	7	135	173	62	120
<i>Средневзвешенные значения DpRVI, $\times 10^{-3}$</i>					
DpRVI _{взвеш}	188	320	370	561	549
Смещение среднеарифметических значений, %	52	-3	13	-10	-2

Статистический анализ остатков $E = DpRVI(t) - S - Trend(t)$ показал отсутствие корреляции со временем (коэффициент корреляции $R < 10^{-15}$), равенство нулю средних значений E и снижение величины разброса ошибок $\sigma(E)$ до 30 % от исходного уровня $\sigma(DpRVI)$. В частности, для соснового леса и подроста значения $\sigma(DpRVI)$, равные 0,124 и 0,072 соответственно, после учёта сезонных вариаций и тренда снизились до значений $\sigma(E)$, равных 0,039 и 0,023.

Оценка биомассы лесного подроста

Оценим биомассу лесного подроста, сравнивая её с биомассой контрольного соснового леса, выбранного эталоном для восстановления леса с сохранением породного состава. Используем аллометрическую зависимость биомассы соснового подроста M от высоты деревьев H по формуле, рекомендованной Министерством природных ресурсов и экологии Российской Федерации для расчёта углеродного баланса (<https://rulaws.ru/acts/Rasporyazhenie-Minprirody-Rossii-ot-30.06.2017-N-20-r/>):

$$M = 0,2169H^{1,4172}.$$

При высоте лесного подроста менее 4 м и высоте соснового леса порядка 18–23 м относительная высота подроста $\leq 0,170-0,212$, относительная биомасса $\leq 0,0815-0,1224$ (отношения равны 0 для открытого участка без растительности и 1 для контрольного соснового леса). При этом отношение вегетационных индексов DpRVI подроста и соснового леса (соотношение объёмного рассеяния) варьируется в диапазоне от 0,53 до 0,72 и, например, за 2015–2019 гг. в среднем было равно $0,285/0,430=0,66$, что кратно выше оценки биомассы по наземным измерениям. Вероятно, причинами этого являются: 1) увеличение DpRVI лесного подроста вследствие заметного влияния рельефа гористой местности и шероховатости поверхности; 2) снижение DpRVI контрольного леса вследствие эффекта «насыщения» отражённого радиолокационного сигнала дециметрового диапазона в плотной лесной среде; 3) искажение

DpRVI сезонными вариациями вследствие неравномерности разреженных исходных данных PALSAR-1/2 ALOS-1/2.

Влияние рельефа местности можно частично нивелировать посредством использования DpRVI участка без растительности. Для этого введём производный индекс относительной доли биомассы DpRBF (англ. Dual-pol Relative Biomass Fraction), поляриметрический аналог индекса доли растительного покрова FVC (англ. Fractional Vegetation Cover), применяемого в оптическом диапазоне для индекса NDVI:

$$DpRBF(t) = \frac{DpRVI_{\text{послепожар}}(t) - k_1 \cdot DpRVI_{\text{поле}}(t)}{DpRVI_{\text{контр.лес}}(t) - k_2 \cdot DpRVI_{\text{поле}}(t)}, \quad (1)$$

где $DpRVI_{\text{послепожар}}(t)$, $DpRVI_{\text{контр.лес}}(t)$, $DpRVI_{\text{поле}}(t)$ — индексы для участка лесовосстановления, соснового леса и поля соответственно; t — годы после пожара ($t = 0$ для 2003 г.). Коэффициенты k_1 и k_2 характеризуют вклад подстилающей поверхности в суммарное объёмное рассеяние участка с лесной растительностью и принимают значения от 0 до 1. Полагая в качестве первого приближения одинаковым влияние шероховатости поверхности и рельефа местности на всех участках ($k_1 = k_2 = 1$), разность DpRVI в числителе и знаменателе формулы (1) характеризует объёмное рассеяние надземной биомассы на участках лесного подроста и контрольного леса соответственно. При схожести рельефа и шероховатости тестовых участков индекс DpRBF является более адекватным индикатором биомассы лесной растительности на территориях со сложным рельефом местности.

На рис. 6 представлены графики изменения индекса DpRBF для пяти тестовых участков после стабилизации процессов послепожарной деградации растительности на участке «Поле» (после 2015 г.) при $k_1 = k_2 = 1$. Для контрольных участков поля и соснового леса DpRBF равен 0 и 1 соответственно. Для смешанного леса с более сложной структурой лесного полога по сравнению с контрольным сосновым лесом более высокие значения DpRVI приводят к $DpRBF < 1$. В период 2015–2019 гг. наблюдается статистически значимый рост DpRBF на участке лесовосстановления (коэффициент корреляции $R = 0,845$, критерий Фишера $F = 32$, значимость $\alpha = 7,2 \cdot 10^{-5}$), падение DpRBF на участке вырубке ($R = -0,464$, $F = 3,57$, $\alpha = 0,08$), а также стабильность DpRBF для смешанного леса ($R = 0,111$, $F = 0,16$, $\alpha = 0,69$). Индексы DpRBF за весь период наблюдений были меньше 0,42. Среднее значение за 2015–2019 гг. равно 0,37.

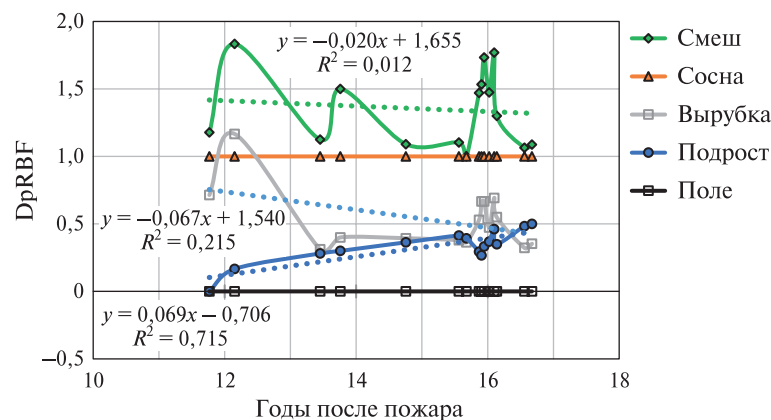


Рис. 6. Динамика поляриметрического аналога доли растительного покрова DpRBF(t) при $k_1 = k_2 = 1$

Во втором приближении можно предположить, что на участке лесного подроста в течение 4–16 лет после пожара при неполном зарастании территории и небольшой высоте молодняка вклад подстилающей поверхности нужно учитывать полностью: $k_1 = 1$. С другой стороны, контрольный сосновый лес можно считать достаточно плотным, густым, без разрывов и прогалов, чтобы вклад подстилающей поверхности стал малозаметным: $k_2 \approx 0$. В этом случае

DpRBF за весь период наблюдений не превысит 0,30, а среднее значение за 2015–2019 гг. снизится до 0,20, что лучше соответствует наземным измерениям.

Для учёта эффекта насыщения в дальнейшем, вероятно, необходимо модифицировать формулу (1) посредством введения систематической поправки $\Delta DpRVI$ для контрольного леса в зависимости от его плотности и высоты. В частности, для контрольного соснового леса в данном исследовании систематическая поправка может варьироваться в диапазоне от 0,5 до 0,9 при $k_1 = k_2 = 1$ и в диапазоне от 0,3 до 0,6 при $k_1 = 1$ и $k_2 = 0$. При этом относительная ошибка спутникового определения биомассы будет порядка 10–15 %, что сопоставимо с ошибками наземных измерений высоты и биомассы подроста и контрольного леса.

Искажение DpRVI и DpRBF из-за неравномерности разреженных спутниковых данных можно смягчить, рассчитывая средневзвешенные величины вместо средних значений. Снижение DpRBF за счёт перехода на средневзвешенные величины в отдельных случаях достигает 14 %. В среднем за 2015–2019 гг. снижение оценки произошло на 5 % — от 0,37 до 0,35.

Заключение

Исследования возможности оценки и мониторинга динамики послепожарного лесовосстановления на основе радарного вегетационного индекса по данным с двойной поляризацией DpRVI по тестовым участкам послепожарного лесовосстановления, открытого поля без растительности, соснового и смешанного леса, расположенных в гористой местности Байкальского региона на основе данных ALOS-1/2 PALSAR-1/2 дециметрового диапазона за 2007–2019 гг. дали следующие результаты:

- Определены эмпирические среднесезонные и среднемесячные значения DpRVI за весь период наблюдений, а также аппроксимированные полиномом 4-й степени сезонные отклонения от среднего значения (S) за последние пять лет. Установлено, что вклад сезонных вариаций индекса DpRVI в общий показатель рассеяния в отсутствии растительного покрова приблизительно равен 60 %, при наличии зрелого соснового или смешанного леса составляет около 70 %. Величины S участка послепожарного лесовосстановления в 1,5–2 раза меньше таковых для контрольных участков леса и в 1,5–2 раза выше таковых для участка без растительности.
- Корреляционно-регрессионный анализ индекса DpRVI после вычета сезонной составляющей S выявил на участке лесовосстановления статистически значимый линейный тренд $Trend(t) = 0,0027t + 0,2603$ с коэффициентом корреляции $R = 0,50$, что свидетельствует об успешном послепожарном восстановлении лесного молодняка. На контрольных участках леса линейные тренды разности DpRVI – S статистически незначимы ($R \leq 0,20$), что подтверждает стабильность лесной биомассы. На участках поля и по его периметру статистически значимые тренды уменьшения DpRVI ($|R| \geq 0,6$) подтверждают деградацию растительности за весь период наблюдений и стабилизацию процесса после 2015 г. ($|R| < 0,09$). Подтверждена более высокая чувствительность индекса DpRVI дециметрового диапазона к росту лесной растительности. Оценочное время послепожарного восстановления DpRVI к эталонному уровню контрольного соснового леса (100 %) составляет 60–90 лет.
- Показано, что даже в сложных условиях гористой местности на основе радарного вегетационного индекса DpRVI возможно получить оценку биомассы лесной растительности посредством: 1) использования индекса относительной доли биомассы растительного покрова DpRBF для учёта рельефа местности и шероховатости поверхности; 2) систематической поправки $\Delta DpRVI$ для коррекции эффекта насыщения радиолокационного импульса в плотном контрольном лесу; 3) заменой средних значений DpRVI средневзвешенными для смягчения влияния сезонных вариаций разреженных данных. При этом относительная ошибка спутникового определения биомассы может быть снижена до уровня ошибок наземных измерений высоты и биомассы подроста и эталонного леса.

Таким образом, результаты исследования показали высокий потенциал применения долговременных радиолокационных данных дециметрового диапазона с двойной поляризацией для оценки и мониторинга динамики послепожарного восстановления лесной растительности в сложных условиях гористой местности Байкальского региона.

Исследования выполнены при поддержке гранта Российского научного фонда № 24-27-20044 (<https://rscf.ru/project/24-27-20044/>). Полевые измерения выполнены в рамках государственного задания Института физического материаловедения СО РАН.

Литература

1. Дмитриев А. В., Чимитдоржиев Т. Н., Дагуров П. Н. (2022а) Оптико-микроволновая диагностика восстановления леса после пожаров // Вычисл. технологии. 2022. Т. 27. № 2. С. 105–121. DOI: 10.25743/ICT.2022.27.2.009.
2. Дмитриев А. В., Чимитдоржиев Т. Н., Добрынин С. И. и др. (2022б) Оптико-микроволновая диагностика залесения сельскохозяйственных земель // Современные проблемы дистанционного зондирования из космоса. 2022. Т. 19. № 4. С. 168–180. DOI: 10.21046/2070-7401-2022-19-4-168-180.
3. Дмитриев А. В., Чимитдоржиев Т. Н., Кирбижекова И. И., Номшиев Ж. Д. Исследование возможностей декомпозиции Н-α для двойной поляризации при радиолокационном мониторинге залесения // Исслед. Земли из космоса. 2023. № 5. С. 3–12. DOI: 10.31857/S0205961423050032.
4. Карпов А. А., Богданов А. П., Пирцхалава-Карпова Н. Р., Демина Н. А. Использование ДЗЗ для мониторинга лесовосстановления в бореальных лесах // Изв. Санкт-Петербургской лесотехн. acad. 2019. № 229. С. 23–43. DOI: 10.21266/2079-4304.2019.229.23-43.
5. Кирбижекова И. И., Чимитдоржиев Т. Н., Дмитриев А. В. и др. Метод оценки лесовосстановления на основе совместного анализа индекса выгорания NBR и радиолокационного индекса объёмной неоднородности DPRVI // Материалы 21-й Международ. конф. «Современные проблемы дистанционного зондирования Земли из космоса». 2023. С. 374. DOI: 10.21046/21DZZconf-2023a.
6. 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.
7. Саженкова Т. В., Пономарёв И. В., Пронь С. П. Методы анализа временных рядов: учебно-метод. пособие. Барнаул: Изд-во Алтайского гос. ун-та, 2020. 60 с.
8. 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.
9. Bondur V., Chimitdorzhiev T., Kirbizhekova I., Dmitriev A. Estimation of postfire reforestation with SAR polarimetry and NDVI time series // Forests. 2022. V. 13. No. 5. Article 814. DOI: 10.3390/f13050814.
10. Bondur V., Chimitdorzhiev T., Kirbizhekova I., Dmitriev A. A novel method of boreal zone reforestation/afforestation estimation using PALSAR-1, -2 and Landsat-5, -8 data // Forests. 2024. V. 15. No. 1. Article 132. DOI: 10.3390/f15010132.
11. Jung M., Lesiv M., Warren-Thomas E. et al. The importance of capturing management in forest restoration targets // Nature Sustainability. 2023. P. 1321–1325. DOI: 10.1038/s41893-023-01192-8.
12. Kirbizhekova I. I., Chimitdorzhiev T. N., Baltukhaev A. K. et al. Reforestation analysis using temporal NDVI and ALOS-2 PALSAR-2 polarimetric data // CEUR Workshop Proc. 2021. V. 3006. P. 116–126. DOI: 10.25743/SDM.2021.24.26.016.
13. Kirbizhekova I. I., Chimitdorzhiev T. N., Dmitriev A. V., Baltukhaev A. K. Monitoring of post-fire reforestation based on vegetation indices of optical and radio bands // 29th Intern. Symp. “Atmospheric and Ocean Optics: Atmospheric Physics”. 2023. V. 12780. Article 127806H. DOI: 10.1117/12.2690939.
14. Mandal D., Kumar V., Ratha D. et al. Dual polarimetric radar vegetation index for crop growth monitoring using Sentinel-1 SAR data // Remote Sensing of Environment, 2020. V. 247. Article 111954. DOI: 10.1016/j.rse.2020.111954.

Analysis of the Dual-pol Radar Vegetation Index potential for reforestation assessment

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

Institute of Physical Materials Science SB RAS, Ulan-Ude 670047, Russia

E-mail: dav@ipms.bscnet.ru

The article presents the results of the analysis of irregular time series of the Dual polarimetric Radar Vegetation Index (DpRVI) for a post-fire reforestation site in mountainous terrain. For comparison, as benchmarks of the initial state and complete forest recovery, a site without vegetation (field) and control sites of coniferous and mixed forests were used. The DpRVI values were calculated based on dual-polarization synthetic aperture radar (SAR) data from ALOS-1 PALSAR-1 (Advanced Land Observing Satellite, Phased Array type L-band Synthetic Aperture Radar) (2007–2011) and ALOS-2 PALSAR-2 (2015–2019); they serve as an indicator of volumetric scattering of the radar signal by the soil-vegetation cover. It has been established that seasonal variations of DpRVI account for 60–70 % of the total root-mean-square deviations. Empirical average seasonal and monthly DpRVI values for the studied sites over the entire observation period have been determined, as well as seasonal deviations S from these average values for the last 5 years. The S values for the post-fire reforestation site are 1.5–2 times smaller than those for the control forest sites and are the same amount larger than for the site without vegetation. The absence of significant trends in the difference $DpRVI - S$ for control forest sites over the entire observation period, as well as on sites without vegetation after 2015, has been shown, indicating the stability of volumetric scattering, in particular, of forest biomass. A significant linear growth trend of the difference $DpRVI - S$ has been identified at the sapling site, with a correlation coefficient of 0.50, indicating a successful post-fire reforestation process. It has been shown that based on the ratio of DpRVI indices of young growth and control forest, an estimate of relative biomass can be obtained with corrections for the influence of mountainous terrain relief, the “saturation” effect, and the seasonal unevenness of ALOS-1/2 PALSAR-1/2 radar polarimetric measurements. The proposed correction methods can reduce the relative errors of satellite determinations of forest sapling biomass to values corresponding to ground measurements of height and biomass of forest saplings and control forest. Overall, the results of the comparative analysis showed that the post-fire growth of DpRVI and, accordingly, the biomass of forest young growth occurs at a rate of 0.57 % per year (assuming 100 % DpRVI of coniferous forest), and the forecasted time for complete forest recovery is around 60–90 years. The study results demonstrated high sensitivity and promising application of L-band radar data with dual polarization in assessing and long-term monitoring of post-fire forest vegetation recovery processes even in mountainous terrain and under conditions of irregular sparse data.

Keywords: remote sensing, forest undergrowth, ALOS-1/2 PALSAR-1/2, DpRVI, seasonal changes, trend

Accepted: 09.09.2024

DOI: 10.21046/2070-7401-2024-21-5-173-187

References

1. 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.
2. Dmitriev A. V., Chimitdorzhiev T. N., Dobrynin S. I. et al. (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.
3. Dmitriev A. V., Chimitdorzhiev T. N., Kirbizhekova I. I., Nomshiev Zh. D., Investigation of the possibilities of H- α decomposition for dual polarization in radar monitoring of afforestation, *Issledovanie Zemli iz kosmosa*, 2023, No. 5, pp. 3–12 (in Russian), DOI: 10.31857/S0205961423050032.
4. Karpov A. A., Bogdanov A. P., Pirtskhalava-Karpova N. R., Demina N. A., Using remote sensing for monitoring of reforestation in boreal forest, *Izvestia Sankt-Peterburgskoj lesotekhnicheskoi akademii*, 2019, No. 229, pp. 23–43 (in Russian), DOI: 10.21266/2079-4304.2019.229.23-43.
5. Kirbizhekova I. I., Chimitdorzhiev T. N., Dmitriev A. V. et al., The method for forest restoration assessment based on the joint analysis of the Normalized Burn Ratio (NBR) index and the radar vegetation index for dual polarization (DpRVI), *Materialy 21-i Mezhdunarodnoi konferentsii “Sovremennye problemy distantsion-*

- nogo zondirovaniya Zemli iz kosmosa” (Proc. 21th Intern. Conf. “Current Problems in Remote Sensing of the Earth from Space”), 2023, p. 374 (in Russian), DOI: 10.21046/21DZZconf-2023a.
6. Rodionova N. V., Vakhnina I. L., Zhelibov 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.
 7. Sazhenkova T. V., Ponomarev I. V., Pron S. P., *Methods of analysis of time series: Educational-methodical manual*, Barnaul: Publ. House of Altai University, 2020, 60 p. (in Russian).
 8. 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.
 9. Bondur V., Chimitdorzhiev T., Kirbizhekova I., Dmitriev A., Estimation of postfire reforestation with SAR polarimetry and NDVI time series, *Forests*, 2022, Vol. 13, No. 5, Article 814, DOI: 10.3390/f13050814.
 10. Bondur V., Chimitdorzhiev T., Kirbizhekova I., Dmitriev A., A novel method of boreal zone reforestation/afforestation estimation using PALSAR-1, -2 and Landsat-5, -8 data, *Forests*, 2024, Vol. 15, No. 1, Article 132, DOI: 10.3390/f15010132.
 11. Jung M., Lesiv M., Warren-Thomas E. et al., The importance of capturing management in forest restoration targets, *Nature Sustainability*, 2023, pp. 1321–1325, DOI: 10.1038/s41893-023-01192-8.
 12. Kirbizhekova I. I., Chimitdorzhiev T. N., Baltukhaev A. K. et al., Reforestation analysis using temporal NDVI and ALOS-2 PALSAR-2 polarimetric data, *CEUR Workshop Proc.*, 2021, Vol. 3006, pp. 116–126, DOI: 10.25743/SDM.2021.24.26.016.
 13. Kirbizhekova I. I., Chimitdorzhiev T. N., Dmitriev A. V., Baltukhaev A. K., Monitoring of post-fire reforestation based on vegetation indices of optical and radio bands, *29th Intern. Symp. Atmospheric and Ocean Optics: Atmospheric Physics*, 2023, Vol. 12780, Article 127806H, DOI: 10.1117/12.2690939.
 14. Mandal D., Kumar V., Ratha D. et al., Dual polarimetric radar vegetation index for crop growth monitoring using Sentinel-1 SAR data, *Remote Sensing of Environment*, 2020, Vol. 247, Article 111954, DOI: 10.1016/j.rse.2020.111954.