

Оптико-микроволновая диагностика залесения сельскохозяйственных земель

А. В. Дмитриев, Т. Н. Чимитдоржиев, С. И. Добрынин,
О. А. Худайбердиева, И. И. Кирбижекова

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

В контексте уточнения оценки поглощения углерода сибирскими бореальными лесами предлагается методика комплексной оценки залесения сосновым подростом заброшенных земель сельскохозяйственного назначения. Методика основана на исследовании зависимости интенсивности обратного радиолокационного рассеяния в L-диапазоне длин волн от биомассы лесного подростка и анализе долговременных рядов вегетационных индексов в период наличия снежного покрова. Для исследований использованы данные радиолокаторов с синтезированной апертурой (РСА) PALSAR-1, -2 (ALOS-1, -2), а также 32-дневные композиты вегетационных индексов NDVI и EVI, полученные с помощью облачной платформы Google Earth Engine (GEE) на основе спектрально-аналитических снимков спутников Landsat-5, -7, -8. Для сравнительной оценки рассмотрены два участка залесения в районе оз. Байкал, изменение которых контролировалось при помощи разновременных данных сверхвысокого разрешения картографического сервиса Google Earth. В результате проведенных исследований показано устойчивое возрастание величины обратного радиолокационного рассеяния от соснового молодняка на протяжении 14–15 лет. За этот период времени суммарная биомасса подростка (стволы и ветви) достигает значений, при которых дальнейший рост деревьев не оказывает влияния на уровень радиолокационного эхосигнала, т.е. наступает порог «насыщения». Установлено, что в начальный период роста молодых деревьев временная динамика интенсивности обратного рассеяния на кросс-поляризации может быть описана линейной зависимостью (коэффициент детерминации больше 0,9). Обнаружено определенное согласие динамики индекса EVI и величины обратного радиолокационного рассеяния для одного из тестовых участков, который характеризуется более ранним и равномерным залесением. Сделан вывод, что предлагаемый комплексный подход достаточно хорошо выделяет период интенсивного увеличения лесного подростка и может быть использован как основа для классификации леса при определении поглощающей способности углерода.

Ключевые слова: спутниковая радиолокация, вегетационные индексы, анализ временных рядов, залесение

Одобрена к печати: 26.07.2022

DOI: 10.21046/2070-7401-2022-19-4-168-180

Введение

Проблема масштабной оценки лесных ресурсов актуальна в связи с климатическими изменениями и соответствующим стремлением мирового сообщества к дальнейшему низкоуглеродному развитию. Разработаны различные модели, прогнозирующие положительный или отрицательный углеродный баланс лесов в 2100 г. (Bellassen, Luyssaert, 2014; Jiang et al., 2020). Выполняются различные оценки поглощающей способности леса. Например, показано отсутствие значимых изменений для углеродного стока до и после прореживания леса — после выборочных рубок (Pinnington et al., 2017), т.е. существует некоторый порог насыщения, после которого поглощение углерода лесными экосистемами изменяется незначительно. В работе (Pugh et al., 2019) 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. Авторы публикации (Chazdon et al., 2016) на примере Латинской Америки также подтверждают значимую роль лесного подростка: молодой лес после сплошных вырубок позволяет активно накапливать углерод в наземной биомассе, тем самым частично уравновешивая выбросы углерода в результате сжигания ископаемого топлива, деградации лесов и других антропогенных факторов. Подобные результаты исследова-

ний свидетельствуют о необходимости выполнения масштабной дистанционной оценки площадей лесного подроста и зрелого леса. Это, в свою очередь, предполагает разработку новых и развитие существующих методов дистанционного зондирования процессов залесения сельскохозяйственных полей и лесовосстановления после рубок и пожаров (Дмитриев и др., 2022; Bondur et al., 2022). При этом необходимо учитывать результаты работ (Chazdon et al., 2016; Pugh et al., 2019); т. е. следует создать методику количественной и качественной дистанционной диагностики перехода от интенсивного роста лесной биомассы к практически зрелому лесу с меньшей динамикой. Это позволит классифицировать лесной подрост с интенсивным накоплением углерода в надземной биомассе, например порядка 1,30 Пг/год (Pugh et al., 2019), и зрелый лес с меньшими величинами поглощения.

Известно, что информация о лесных ресурсах, получаемая по данным оптического и микроволнового диапазонов, различна (Барталев и др., 2022; Чимитдоржиев и др., 2018; Lehmann et al., 2015) по причине многих факторов. Однако основными выступают проникающая способность электромагнитных волн различного диапазона и геометрия съёмки. Так, по мультиспектральным оптическим снимкам традиционно оцениваются породный состав и проективное покрытие растительностью (Ховратович и др., 2019). Это 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. Также ввиду пассивного характера зондирования в оптическом диапазоне длин волн наличие облачности и атмосферных аэрозолей может значительно препятствовать получению достоверных результатов.

В последние 30 лет для исследования лесов активно используются космические радиолокаторы с синтезированной апертурой (РСА). Представляясь активными сенсорами, РСА выступают в качестве всепогодных и круглосуточных инструментов наблюдения за земной поверхностью. Микроволновое излучение радиолокаторов, особенно в длинноволновых L- и P-диапазонах, обладает способностью глубоко проникать в лесной полог, что позволяет получать информацию о его структуре. Считается, что лесной подрост с характерными поперечными размерами, много меньшими дециметровых длин волн, полностью радиопрозрачен, поэтому обратное радарное рассеяние происходит от земной поверхности. Это не позволяет определить время начала появления лесного подроста. 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. Как правило, обратное рассеяние от лесной среды возрастает до некоторого предела — до определённой величины надземной биомассы леса. Например, для хвойного леса в P-диапазоне это 200 т/га, в L-диапазоне — 100 т/га (Dobson et al., 1992; Le Toan et al., 1992; Yu, Saatchi, 2016). Затем возрастание величины обратного радарного рассеяния прекращается и сохраняется на одном уровне — соответствующем зрелому лесу. Тем не менее рост деревьев может продолжаться, хотя уже и не такой интенсивный.

В целом сопоставление данных оценки лесной биомассы (*англ.* Growing Stock Volume — GSV), полученных с помощью различных сенсоров, включая лазерное сканирование с самолётов, оптические мультиспектральные данные и данные сверхвысокого разрешения, радиолокационные данные, а также их комбинации, показало, что среднеквадратическая ошибка её определения составляет 35–55 % (Rees et al., 2021).

В настоящее время на орбите функционирует один радиолокатор L-диапазона PALSAR-2 (*англ.* Phased Array type L-band Synthetic Aperture Radar), установленный на спутнике ALOS-2 (*англ.* Advanced Land Observing Satellite). На 2022–2023 гг. запланированы запуски радиолокаторов Японского агентства аэрокосмических исследований (*англ.* Japan Aerospace Exploration Agency — JAXA) PALSAR-3 L-диапазона и Европейского космического агентства (*англ.* European Space Agency — ESA) Biomass P-диапазона. Последний предназначен для

измерений биомассы леса с целью глобальной оценки потоков углерода (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 дистанционного зондирования Земли (EO4SD Forest, <https://www.eo4sd-forest.info/global-biomass>; Santoro et al., 2018). В целом, судя по тематике докладов, представленных на специализированных секциях крупнейшего ежегодного международного симпозиума по геонаукам и дистанционному зондированию IGARSS (*англ.* International Geoscience and Remote Sensing Symposium) (<https://igarss2019.org/TechnicalProgram.asp>; https://igarss2021.com/IG21_ProgramGuide.pdf), отмечается дальнейшее увеличение количества исследований биофизических параметров леса для глобальных оценок потоков углерода. При этом используются данные как оптических сенсоров, так и спутниковых радиолокаторов.

Таким образом, цель настоящей работы заключается в создании методики комплексных оптико-микроволновых измерений динамики роста лесного молодняка и оценки временного периода интенсивного формирования его надземной биомассы.

Описание тестового полигона и используемые данные

В качестве объекта исследования рассмотрим тестовый полигон, называемый «Урочище Красноярские пашни», который расположен в прибрежной части оз. Байкал на территории Кабанского р-на Республики Бурятия (*рис. 1*, см. с. 171). Он является частью центральной экологической зоны Байкальской природной территории и относится к категории земель сельскохозяйственного назначения. В последние десятилетия прошлого века данная местность не обрабатывалась и использовалась как сенокосные угодья.

Урочище имеет вытянутую с запада на восток форму и, за исключением небольшой части на северо-западе, окружено зрелым сосновым лесом (см. *рис. 1а*). Предварительный визуальный анализ архивной космической съёмки на картографическом сервисе Google Планета Земля (*англ.* Google Earth) показал, что залесение территории тестового полигона происходило неравномерно. Первой интенсивно начала зарастать восточная часть, обозначенная зелёным контуром на *рис. 1б*. Затем — западная (оранжевая пунктирная линия). Поэтому для оценки динамики залесения на тестовом полигоне были выбраны два участка в виде окружностей радиусом 100 м и площадью 3,1 га: первый расположен в восточной части (1 на *рис. 1а, б*, красная окружность) и второй — в западной части (2 на *рис. 1а, б*, голубая пунктирная окружность). Фотографии этих участков за 2013 г. представлены на *рис. 1в, г*. Для сравнительной оценки были выбраны два контрольных участка аналогичного размера: зрелый сосновый лес (3 на *рис. 1а, б*) и сельскохозяйственное поле (4 на *рис. 1а*).

Для исследования динамики залесения сельхозугодий были использованы данные как оптических, так и радиолокационных сенсоров. Для того чтобы отследить динамику роста деревьев, очевидно, необходимы долговременные ряды данных. Среди оптических сенсоров выделяется серия спутников Landsat, ведущая наблюдение земной поверхности с 1972 г. и по настоящее время. В настоящем исследовании использовались доступные в облачной платформе GEE (*англ.* Google Earth Engine) (Gorelick et al., 2017) 32-дневные данные усреднённых вегетационных индексов растительности EVI (*англ.* Enhanced Vegetation Index — усовершенствованный вегетационный индекс) и NDVI (*англ.* Normalized Difference Vegetation Index — нормализованный разностный вегетационный индекс), полученные на основе обработки коллекции мультиспектральных изображений спутников Landsat-5 (1984–2012) (<https://developers.google.com/earth-engine/datasets/catalog/landsat-5>), Landsat-7 (1999–наст. вр.) (<https://developers.google.com/earth-engine/datasets/catalog/landsat-7>) и Landsat-8 (2013–наст. вр.) (<https://developers.google.com/earth-engine/datasets/catalog/landsat-8>). Изображения спутника Landsat-7 использовались для заполнения пропуска в данных между окончанием работы Landsat-5 и началом съёмки Landsat-8 (с октября 2011 г. по апрель 2013 г.). Всего за период с 09.05.1986 по 19.12.2021 было проанализировано 381 композитное изображение вегетационных индексов, в том числе 261 изображение Landsat-5, 15 изображений Landsat-7

и 105 изображений Landsat-8. Пространственное разрешение данных композитов составляло 30 м/пиксель.

В качестве радиолокационных данных использовались временные ряды данных японских РСА PALSAR-1/ALOS-1 (2007–2010) и PALSAR-2/ALOS-2 (2015–2020). Изображения получены в L-диапазоне (длина волны излучения 23,5 см). Спутник ALOS-1 с радиолокатором PALSAR-1 на борту был запущен 24 января 2006 г. и проработал на орбите 5 лет. РСА PALSAR-2/ALOS-2, запущенный 24 мая 2014 г., работает в ограниченном режиме и в настоящее время. Данные обоих спутников были получены в режиме FBD (англ. Fine Beam Dual) (разрешение 10 м/пиксель) на согласованной горизонтальной поляризации (HH) и кросс-поляризации (HV) (V — вертикальная) и восходящей орбите. Углы падения составляли 37,2 и 33,2° для PALSAR-1 и PALSAR-2 соответственно. Список использованных изображений приведён в табл. 1. Последние цифры в идентификаторе сцены PALSAR-2/ALOS-2 обозначают дату съёмки в формате ггммдд. Ввиду значительных сезонных различий (до 4–7 дБ) величин обратного радарного рассеяния были использованы данные сезона положительных среднесуточных температур (май – октябрь).

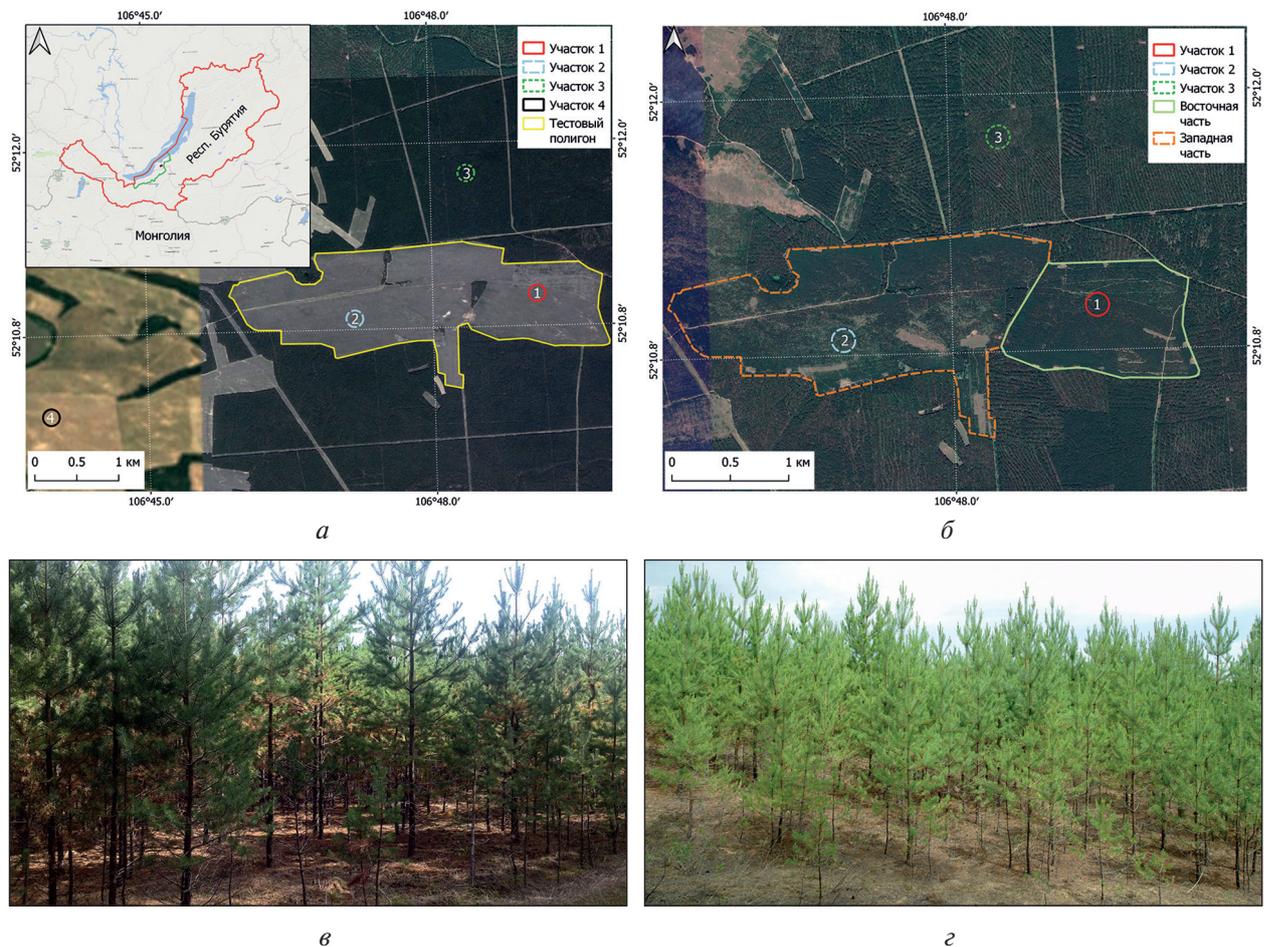


Рис. 1. Местоположение тестовых участков (врезка), изображения из картографического сервиса Google Earth: а — 5 июня 2004 г., б — 4 июля 2020 г.; фотографии 2013 г.: в — участок 1, г — участок 2

Так как обратное отражение в микроволновом диапазоне очень чувствительно к влажности земных покровов, табл. 1 дополнена данными об осадках в день радиолокационных измерений. Для этого были использованы доступные в GEE глобальные измерения осадков (Huffman et al., 2020, https://developers.google.com/earth-engine/datasets/catalog/NASA_GPM_L3_IMERG_V06), которые дополнительно верифицировались архивными данными метеорологического сайта rp5.ru (<https://rp5.ru/>).

Таблица 1. Радиолокационные данные PALSAR-1, -2/ALOS-1, -2

PALSAR-1/ALOS-1		PALSAR-2/ALOS-2	
Идентификатор сцены/Дата	Осадки	Идентификатор сцены	Осадки
ALPSRP075351040/2007.06.24	—	ALOS2061741040-150715	—
ALPSRP082061040/2007.08.09		ALOS2072091038-150923	Дождь
ALPSRP122321040/2008.05.11		ALOS2115561038-160713	—
ALPSRP129031040/2008.06.26		ALOS2125911038-160921	
ALPSRP142451040/2008.09.26		ALOS2169381038-170712	
ALPSRP182711040/2009.06.29	Ливень	ALOS2179731038-170920	
ALPSRP189421040/2009.08.14	Дождь	ALOS2223201038-180711	Дождь
ALPSRP196131040/2009.09.29		ALOS2229411038-180822	—
ALPSRP236391040/2010.07.02	—	ALOS2279831035-190729	Дождь
ALPSRP243101040/2010.08.17	Ливень	ALOS2327441035-200615	—
ALPSRP249811040/2010.10.02	—		

Методика исследований

Основа исследования — совместный анализ временных рядов интенсивности обратного радарного рассеяния на различных поляризациях и вегетационных индексов, полученных с помощью оптических сенсоров. Ожидается, что рост лесных насаждений приведёт к увеличению амплитуды радарного сигнала. Это связано с тем, что по мере роста молодых деревьев увеличивается их биомасса, количество и толщина ветвей, усложняется геометрическая структура. В целом это приводит к увеличению обратного рассеяния и заметным эффектам деполяризации сигнала. Долговременные ряды вегетационных индексов позволяют оценить динамику зарастания с точки зрения изменения проективного покрытия подростом исследуемой территории.

При интерпретации отражённых радиолокационных сигналов необходимо учитывать особенности наклонного зондирования космическими радиолокаторами, приводящие к геометрическим и радиометрическим искажениям в исходных данных. Поэтому для получения достоверных результатов необходимо проведение обоих типов коррекций. На *рис. 2* (см. с. 173) показаны этапы предварительной обработки амплитудных радарных данных в виде графов (алгоритмов) для программы ESA SNAP (*англ.* Sentinel Application Platform, <http://step.esa.int>). На первом этапе (см. *рис. 2а*) происходит предварительная обработка каждого входного изображения, включающая следующие шаги:

- 1) Read — чтение входного изображения;
- 2) Calibration — радиометрическая калибровка до значений β^0 ;
- 3) Multilook — процедура некогерентного накопления для устранения спекл-шума;
- 4) Subset — извлечение из исходного изображения только исследуемой области для ускорения процесса обработки;
- 5) BandSelect — выбор необходимой поляризации;
- 6) Write — запись результата в выходной файл.

На втором этапе (см. *рис. 2б*) происходит совмещение с учётом цифровой модели рельефа (шаг 2: DEM-Assited-Coregistration) всех полученных и предварительно обработанных на первом этапе изображений в единый набор данных. Затем данный набор фильтруется мультитременным спекл-фильтром (шаг 3: Multi-Temporal-Speckle-Filter) и подвергается процедуре радиометрической коррекции с учётом рельефа (*англ.* radiometric terrain correction — RTC) (Small, 2011) (шаг 4: Terrain-Flattening). Данная процедура позволяет корректно учесть площадь отражающей поверхности, формирующей каждый отдельный пиксель изображения,

и тем самым нормализовать обратное рассеяние. Особенно это актуально в гористой местности. Шаг 5: Terrain-Correction позволяет выполнить геометрическую коррекцию изображений (ортотрансформирование) с учётом рельефа местности. Затем полученные значения интенсивности обратного радарного рассеяния переводятся в децибелы (шаг 6: LinearToFromdB) и записываются в выходной файл (шаг 7: Write). В результате мы получаем временные ряды величины γ^0 (дБ) (*англ.* gamma nought — гамма-ноль), пригодные для последующего анализа.

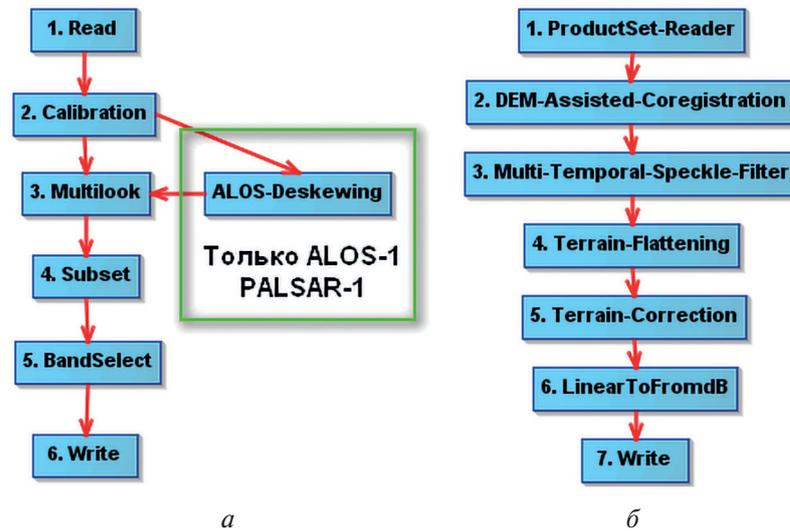


Рис. 2. Этапы обработки радиолокационных данных: *a* — этап 1, предварительная обработка каждого входного изображения; *б* — этап 2, совместная обработка набора данных, полученных на этапе 1

Данные вегетационных индексов на исследуемую территорию извлекались непосредственно из каталога GEE с помощью сценария, выполняемого в интерактивной среде разработки, и сохранялись в виде табличных данных.

Результаты

Анализ временных рядов радиолокационных данных

На рис. 3 представлены временные ряды интенсивности обратного радарного рассеяния PALSAR-1, -2/ALOS-1, -2 для HH- и HV-поляризации (см. рис. 3а и б соответственно) на тестовых и контрольных участках. Значения интенсивности получены усреднением значений всех пикселей, находящихся в пределах каждого участка. Результаты, представленные на графиках, и линии тренда (пунктирные линии) показывают, что наблюдается устойчивый рост интенсивности радиолокационного эхосигнала для участков 1 и 2 с подрастающим лесом как на основной, так и на кросс-поляризации. Вместе с этим отмечается отсутствие значимых изменений для контрольного участка леса (≤ 1 дБ в среднем) и уменьшение обратного рассеяния (на 3–5 дБ) от сельскохозяйственного поля. Это уменьшение связано с изменением типа хозяйственной деятельности на данном поле, а именно с переходом от выращивания фуражных культур (овёс, ячмень) с соответствующей подготовкой почвы (вспашка) к выращиванию многолетних кормовых трав. Уменьшение шероховатости почвы за счёт осадков и ветровой эрозии привело к падению уровня обратного радиолокационного рассеяния.

Рисунок 3 также количественно подтверждает предварительные выводы о неравномерности зарастания урочища. Так, рассеяние от участка 2 в западной части на момент первой съёмки (24.06.2007) превышает рассеяние от поля (участок 4) на 1,6 дБ, тогда как для участка 1 в восточной части эта разница достигает 8 дБ на согласованной поляризации. На кросс-поляризации ситуация аналогичная. Также очевидно, что на HH-поляризации для участка 1

уже в 2017 г. достигнут порог насыщения, т.е. величина отражённого сигнала от лесного подроста сравнялась по величине с уровнем отражённого сигнала от взрослого леса, и дальнейшее исследование динамики роста лесных насаждений с помощью только амплитудных характеристик становится затруднительным. Отметим, что для HV-поляризации на данном участке порог насыщения был достигнут только три года спустя, в 2020 г., а на участке 2 до насыщения ещё остаётся не более 2 дБ.

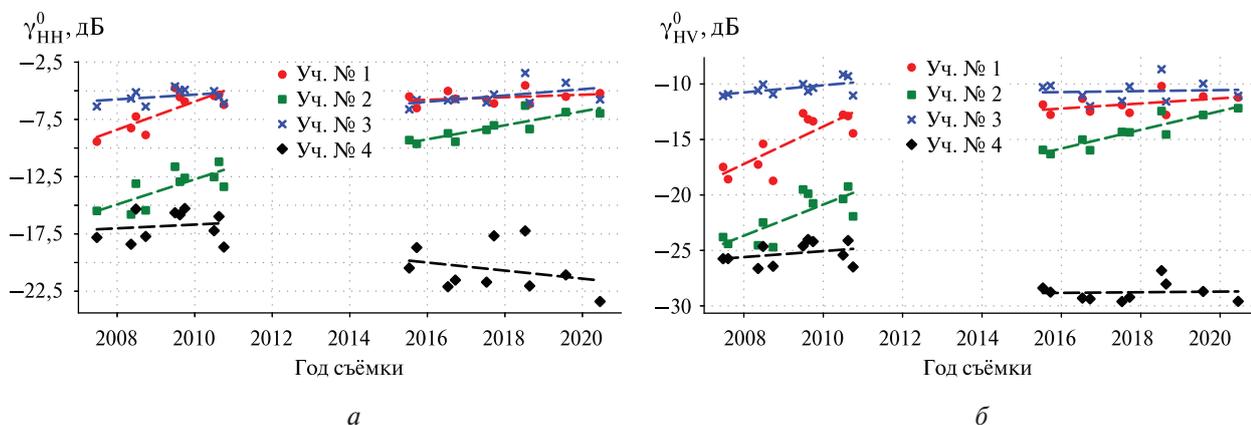


Рис. 3. Динамика интенсивности обратного радарного рассеяния PALSAR-1, -2/ALOS-1, -2 на тестовых участках: а — HH-поляризация; б — HV-поляризация

Проведём регрессионный анализ полученных результатов. В табл. 2 приведены рассчитанные на основе линейных моделей годовые изменения интенсивности обратного рассеяния для каждого участка на интервалах съёмки каждого спутника в отдельности и в общем за весь период. Также в таблице приведён коэффициент детерминации R^2 модели, показывающий соответствие изменения данных линейной функции. Модели с коэффициентом детерминации выше 0,5 считаются приемлемыми, а при $R^2 > 0,8$ — хорошими.

Таблица 2. Динамика изменения интенсивности обратного радарного рассеяния (дБ/год) и её корреляция с линейными трендами

№ участка	PALSAR-1 (2007–2010)		PALSAR-2 (2015–2020)		PALSAR-1, -2 (2007–2020)	
	HH/ R^2	HV/ R^2	HH/ R^2	HV/ R^2	HH/ R^2	HV/ R^2
1	1,23/0,67	1,69/0,66	0,11/0,09	0,23/0,19	0,16/0,30	0,43/0,61
2	1,10/0,54	1,40/0,59	0,61/0,73	0,84/0,83	0,64/0,90	0,91/0,93
3 (лес)	0,21/0,13	0,32/0,31	0,27/0,23	0,04/0,01	0,02/0,01	-0,02/0,01
4 (поле)	0,16/0,02	0,27/0,10	-0,35/0,08	0,03/0,003	-0,43/0,57	-0,37/0,68

Данные в табл. 2 показывают, что в период с 2007 по 2010 г. происходило значительное увеличение уровня отражённого сигнала (более 1 дБ/год), связанное с интенсивным ростом молодых деревьев. В период с 2015 по 2020 г. рост уровня сигнала для участка 1 существенно замедлился, что говорит о достижении порога насыщения. Для участка 2 также происходило замедление роста амплитуды рассеяния, однако в меньшей степени. Также отметим, что для этого участка линейный характер такого роста выражен даже более явно, чем для первоначального периода. В целом за период радиолокационных наблюдений (2007–2020) заметно большее влияние роста деревьев на уровень отражения на кросс-поляризации. Годовой прирост уровня отражения для HV-поляризации в 1,5–2,5 раза выше, чем для HH-поляризации. Это связано с тем, что на начальном этапе роста молодой поросли сосны её геометрические

размеры в вертикальном направлении (стволы) увеличиваются гораздо быстрее, чем в горизонтальном (ветви), что приводит к быстрому увеличению эффективной поверхности рассеяния, наблюдаемому именно для деполаризованного радиолокационного сигнала. В период интенсивного роста молодых деревьев уровень отражённого сигнала как на основной, так и на кросс-поляризации может быть с хорошей точностью аппроксимирован линейной зависимостью (см. участок 2 и начальный период для участка 1). Экстраполируя результаты для участка 2, можно спрогнозировать, что к лету 2022 г. он зарастёт настолько, что будет достигнут порог насыщения. Если принять за начало роста 2007 г., то период интенсивного роста соснового молодняка, в течение которого его можно определить по амплитудным данным L-диапазона, составляет 15 лет.

Анализ временных рядов вегетационных индексов

Анализ вегетационных индексов, полученных с помощью платформы GEE, показал их значительную сезонную вариативность на тестовых участках. Отметим, что индекс EVI на исследуемой территории принимает максимальные значения в зимние месяцы, тогда как NDVI — в летние. В целом зимние индексы показывают более стабильный характер роста от года к году, без значительных колебаний, что связано с вечнозелёным подростом хвойных деревьев. Поэтому из общего набора данных для исследования были использованы значения (рис. 4), полученные в период с 1 ноября одного года по 30 марта года, следующего за ним. Дополнительно эти данные усреднялись скользящим окном размера 11, а значения индексов нормировались к значениям, полученным для зрелого леса. На графиках рис. 4 по вспомогательной оси для сравнения приведены значения интенсивности обратного радарного рассеяния γ^0 , также нормированные к значениям, полученным для зрелого леса. Отметим, что данные на рис. 4 представлены начиная с 2000 г., так как в предыдущий период наблюдений (1986–1999) никаких заметных изменений вегетационных индексов на тестовых участках не происходило.

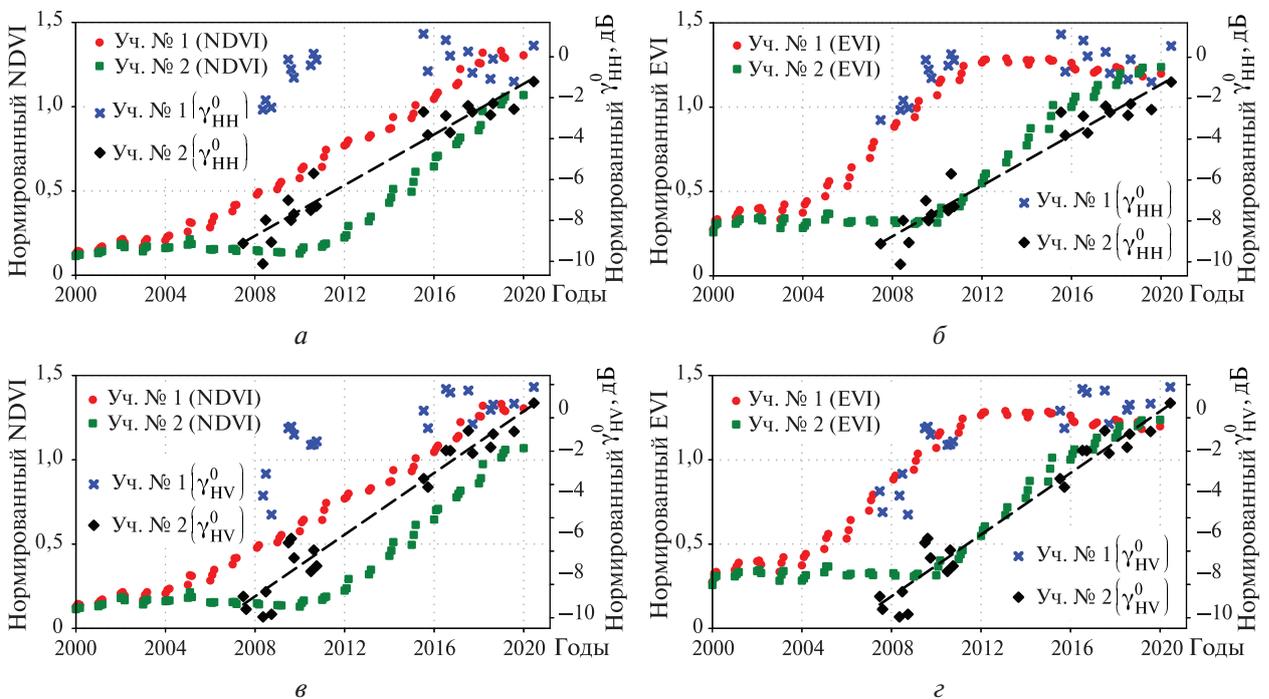


Рис. 4. Временные зависимости нормированных вегетационных индексов и интенсивностей обратного рассеяния для участков 1 и 2: а — $NDVI/\gamma_{HH}^0$; б — EVI/γ_{HH}^0 ; в — $NDVI/\gamma_{HV}^0$; г — EVI/γ_{HV}^0

На *рис. 4а* представлены временные зависимости нормированного индекса NDVI для участков 1 и 2. Видно, что для участка 1 с начала 2004 г. наблюдается постепенный рост значений индекса, который в марте 2015 г. уже превысил значения NDVI для взрослого леса и продолжил расти вплоть до сезона 2018–2019 гг., после которого рост прекратился. Изменения NDVI по участку 2 начались заметно позднее, с начала 2010 г., и продолжаются на всём протяжении периода наблюдений.

Иначе себя ведёт нормированный EVI для участка 1 (см. *рис. 4б, г*). Если увеличение индекса началось в то же время, что и для NDVI, то динамика роста индекса заметно отличается. Так, в марте 2009 г. EVI уже превысил EVI взрослого леса, а к началу 2012 г. был достигнут порог, после которого значения индекса стабилизировались и даже начали незначительно снижаться. Таким образом, рост молодого леса, отслеживаемый индексом NDVI, составил 14–15 лет, а индексом EVI — только 8. Для второго участка характерна аналогичная первому динамика роста EVI, только с запозданием на 6 лет. Также обращает на себя внимание сходное поведение кривых нормированных γ_{HH}^0 , γ_{HV}^0 и EVI для этих участков.

Анализ графиков на *рис. 4* приводит к интересному результату. Как видно на примере участка 2, устойчивый рост интенсивности обратного рассеяния (см. пунктирную линию на *рис. 4*) как на HH- так и на HV-поляризации (см. *рис. 4а, б и в, г* соответственно) начался в 2008 г., т. е. на два года раньше, чем аналогичный рост стал заметен для обоих вегетационных индексов. Это можно объяснить изменением механизма обратного рассеяния (Дмитриев и др., 2022), а именно уменьшением компоненты поверхностного рассеяния (однократное отражение от шероховатой поверхности поля) с одновременным увеличением двукратного углового отражения от стволов лесного подроста. Это свидетельствует об увеличении геометрических размеров деревьев, что согласуется с результатами работы (Kobayashi et al., 2012). Вместе с тем оценка по вегетационным индексам показывает, что проективное покрытие в этот временной промежуток ещё не изменяется значительно.

Заключение

В результате проведённых исследований установлено устойчивое возрастание величины обратного радиолокационного рассеяния в L-диапазоне (PCA PALSAR-1, -2/ALOS-1, -2) от лесного соснового молодняка на протяжении 14–15 лет. За этот период суммарная биомасса подроста (стволы и ветви) достигает значений, при которых дальнейший рост деревьев не оказывает влияния на уровень радиолокационного эхосигнала, т. е. наступает порог «насыщения» и дальнейшее исследование динамики роста лесных насаждений с помощью только амплитудных характеристик становится затруднительным. Отмечено, что, несмотря на более высокий годовой прирост уровня отражения на кросс-поляризации, эффект насыщения быстрее наступает на основной поляризации. Показано, что в период интенсивного роста молодых деревьев изменение интенсивности обратного рассеяния на кросс-поляризации можно с хорошей точностью (коэффициент детерминации больше 0,9) аппроксимировать линейной функцией.

Анализ вегетационных индексов NDVI и EVI, полученных с помощью облачной платформы Google Earth Engine на основе данных группировки спутников Landsat-5, -7, -8, показал различие в их способности оценивать скорость роста молодых деревьев на участках бывших земель сельскохозяйственного назначения. Так, индекс EVI для лесного подроста за 5 лет достигает и затем превышает аналогичные значения для контрольного участка зрелого леса, а за 8 лет доходит до порога, после которого перестаёт расти. Индекс NDVI, в свою очередь, демонстрирует более плавную динамику роста до порога насыщения, сопоставимую по времени с ростом величины обратного радиолокационного рассеяния, т. е. 14–15 лет. Сравнение динамики изменения обратного рассеяния и вегетационных индексов показало, что на начальном этапе интенсивного роста деревьев обратное рассеяние хорошо коррелирует с индексом EVI. Отмечено запаздывание на два года начала роста значений вегетационных индексов относительно начала роста интенсивности обратного радарного рассеяния, что

свидетельствует о высокой чувствительности микроволнового излучения к геометрической структуре соснового подростка.

Таким образом, оптико-микроволновое зондирование позволяет оценить динамику роста лесных насаждений и временной интервал увеличения надземной биомассы до уровня, сравнимого со зрелым лесом. Последнее может быть использовано для уточнения оценки поглощающей способности углерода сибирскими бореальными лесами, которые достаточно интенсивно прирастают за счёт залесения сельскохозяйственных земель.

Работа выполнена за счёт гранта Российского научного фонда (проект № 22-27-20081).

Авторы признательны японскому аэрокосмическому агентству JAXA за данные PALSAR-1, -2/ALOS-1, -2, предоставленные в соответствии с проектом ALOS-2 RA6 (PI: 3092).

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.* Оптико-микроволновая диагностика восстановления леса после пожаров // *Вычисл. технологии*. 2022. Т. 27. № 2. С. 105–121. DOI: 10.25743/ICT.2022.27.2.009.
3. *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. 6. № 4. С. 102–110. DOI: 10.21046/2070-7401-2019-16-4-102-110.
4. *Чимитдоржиев Т. Н., Ефременко В.* Об использовании различных индексов вегетации в дистанционном зондировании экосистем // *Исслед. Земли из космоса*. 1998. № 3. С. 49–56.
5. *Чимитдоржиев Т. Н., Дмитриев А. В., Кирбижекова И. И., Шерхоева А. А., Балтухаев А. К., Дагуров П. Н.* 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.
6. *Banda F., Giudici D., Le Toan T., Mariotti d’Alessandro M., Papathanassiou K., Quegan S., Riembauer G., Scipal K., Soja M., Tebaldini S., Ulander L., Villard L.* The BIOMASS Level 2 Prototype Processor: Design and Experimental Results of Above-Ground Biomass Estimation // *Remote Sensing*. 2020. V. 12. No. 6. Art. No. 985. 28 p. DOI: 10.3390/rs12060985.
7. *Bellassen V., Luyssaert S.* Carbon sequestration: Managing forests in uncertain times // *Nature*. 2014. V. 506. No. 7487. P. 153–155. DOI: 10.1038/506153a.
8. *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. Art. No. 814. 10 p. DOI: 10.3390/f13050814
9. *Chazdon R. L., Broadbent E. N., Rozendaal D. M. A., Bongers F., Zambrano A. M. A., Aide T. M., Balvanera P., Becknell J. M., Boukili V., Brancalion P. H. S., Craven D., Almeida-Cortez J. S., Cabral G. A. L., Jong Ben de, Denslow J. S., Dent D. H., DeWalt S. J., Dupuy J. M., Durán S. M., Espírito-Santo M. M., Fandino M. C., César R. G., Hall J. S., Hernández-Stefanoni J. L., Jakovac C. C., Junqueira A. B., Kennard D., Letcher S. G., Lohbeck M., Martínez-Ramos M., Massoca P., Meave J. A., Mesquita R., Mora F., Muñoz R., Muscarella R., Nunes Y. R. F., Ochoa-Gaona S., Orihuela-Belmonte E., Peña-Claros M., Pérez-García E. A., Piotta D., Powers J. S., Rodríguez-Velázquez J., Romero-Pérez I. E., Ruíz J., Saldarriaga J. G., Sanchez-Azofeifa A., Schwartz N. B., Steininger M. K., Swenson N. G., Uriarte M., Breugel M., Wal H., Veloso M. D. M., Vester H., Vieira I. C. G., Bentos T. V., Williamson G. B., Poorter L.* Carbon sequestration potential of second-growth forest regeneration in the Latin American tropics // *Science Advances*. 2016. V. 2. No. 5. Art. No. e1501639. 10 p. DOI: 10.1126/sciadv.1501639.
10. *Dobson M. C., Ulaby F. T., LeToan T., Beaudoin A., Kasischke E. S., Christensen N.* 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.
11. *Gorelick N., Hancher M., Dixon M., Ilyushchenko S., Thau D., Moore R.* 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.

12. *Huffman G. J., Stocker E. F., Bolvin D. T., Nelkin E. J., Tan J.* GPM IMERG Final Precipitation L3 Half Hourly 0.1 degree×0.1 degree V06. Greenbelt, MD: Goddard Earth Sciences Data and Information Services Center (GES DISC), 2020. DOI: 10.5067/Gpm/Imerg/3b-Hh/06 (accessed: 24.05.2022).
13. *Jiang M., Medlyn B. E., Drake J. E., Duursma R. A., Anderson I. C., Barton C. V. M., Boer M. M., Carrillo Y., Castañeda-Gómez L., Collins L., Crou K. Y., De Kauwe M. G., dos Santos B. M., Emmerson K. M., Facey S. L., Gherlenda A. N., Gimeno T. E., Hasegawa S., Johnson S. N., Kännaste A., Macdonald C. A., Mahmud K., Moore B. D., Nazaries L., Neilson E. H. J., Nielsen U. N., Niinemets U., Noh N. J., Ochoa-Hueso R., Pathare V. S., Pendall E., Pihlblad J., Piñeiro J., Powell J. R., Power S. A., Reich P. B., Renchon A. A., Riegler M., Rinnan R., Rymer P. D., Salomón R. L., Singh B. K., Smith B., Tjoelker M. G., Walker J. K. M., Wujeska-Klause A., Yang J., Zaehle S., Ellsworth D. S.* 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.
14. *Kobayashi S., Omura Y., Sanga-Ngoie K., Widyorini R., Kawai S., Supriadi B., Yamaguchi Y.* Characteristics of Decomposition Powers of L-Band Multi-Polarimetric SAR in Assessing Tree Growth of Industrial Plantation Forests in the Tropics // *Remote Sensing*. 2012. V. 4. No. 10. P. 3058–3077. DOI: 10.3390/rs4103058.
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., Mitchell A., Zhou Z.-S., Held A., Milne T., Tapley I.* 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., Lawless A. S., Morison J. I., Nichols N. K., Wilkinson M., Quaije T. L.* 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., Poulter B., Arneeth A., Haverd V., Calle L.* Role of forest regrowth in global carbon sink dynamics // *Proc. National Academy of Sciences*. 2019. VI. 116. No. 10. P. 4382–4387. DOI: 10.1073/pnas.1810512116.
19. *Rees W. G., Tomaney J., Tutubalina O., Zharko V., Bartalev S.* Estimation of Boreal Forest Growing Stock Volume in Russia from Sentinel-2 MSI and Land Cover Classification // *Remote Sensing*. 2021. V. 13. No. 21. Art. No. 4483. DOI: 10.3390/rs13214483.
20. *Santoro M., Cartus O., Mermoz S., Bouvet A., Le Toan T., Carvalhais N., Rozendaal D., Herold M., Avitabile V., Quegan S., Carreiras J., Rauste Y., Balzter H., Schmullius C., Seifert F. M.* GlobBiomass — global above-ground biomass and growing stock volume datasets. 2018. URL: <https://globbiomass.org/products/global-mapping/> (accessed 24.05.2022).
21. *Small D.* Flattening Gamma: Radiometric Terrain Correction for SAR Imagery // *IEEE Trans. Geoscience and Remote Sensing*. 2011. V. 49. No. 8. P. 3081–3093. DOI: 10.1109/TGRS.2011.2120616.
22. *Yu Y., Saatchi S.* Sensitivity of L-Band SAR Backscatter to Aboveground Biomass of Global Forests. // *Remote Sensing*. 2016. V. 8. No. 6. Art. No. 522. DOI: 10.3390/rs8060522.

Optical-microwave diagnostics of agricultural land afforestation

**A. V. Dmitriev, T. N. Chimitdorzhiev, S. I. Dobrynin,
O. A. Khudaiberdieva, I. I. Kirbizhekova**

*Institute of Physical Materials Science SB RAS, Ulan-Ude 670047, Russia
E-mail: dav@ipms.bsnet.com*

A method for comprehensive assessment of pine forest afforestation at abandoned agricultural fields is proposed in the context of clarifying carbon sequestration by Siberian boreal forests. The method is based on the correlation assessment between forest undergrowth biomass and the radar backscattering in L-band as well as the analysis of long-term series of vegetation indices during the presence of snow cover. Data from synthetic aperture radars (SAR) ALOS-1, -2/PALSAR-1, -2, as well as 32-day composites of vegetation indices NDVI and EVI, obtained with the help of Google Earth Engine (GEE) cloud platform from multispectral optical images of Landsat-5, -7, -8 satellites were used for the research. Two areas of afforestation were considered for comparative assessment near Lake Baikal,

the change of which was tracked using multi-temporal high-resolution data from the Google Earth service. A continuous increase of the radar backscattering from forest young growth for 14–15 years has been shown as a result of the conducted investigations. During this time period the total biomass of undergrowth (trunks and branches) reaches values at which further growth of trees does not affect the level of the radar backscattering, i.e. the «saturation» effect occurs. It is established that in the initial period of growth of young trees, the temporal dynamics of the backscattering intensity on cross-polarization can be described by a linear dependence (the coefficient of determination is greater than 0.9). A certain agreement was found between the dynamics of the EVI index and the radar backscattering intensity for one of the test sites, which is characterized by earlier and uniform afforestation. It is concluded that the proposed approach allows identifying the period of intense growth of forest undergrowth and can be used as a basis for forest classification in determining carbon sequestration.

Keywords: satellite radar, vegetation indices, time series analysis, afforestation

Accepted: 26.07.2022

DOI: 10.21046/2070-7401-2022-19-4-168-180

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., 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. 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.
4. 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).
5. Chimitdorzhiev T. N., Dmitriev A. V., Kirbizhekova I. I., Sherhoeva A. A., Baltukhaev A. K., Dagurov P. N., 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.
6. Banda F., Giudici D., Le Toan T., Mariotti d’Alessandro M., Papathanassiou K., Quegan S., Riembauer G., Scipal K., Soja M., Tebaldini S., Ulander L., Villard L., The BIOMASS Level 2 Prototype Processor: Design and Experimental Results of Above-Ground Biomass Estimation, *Remote Sensing*, 2020, Vol. 12, No. 6, Art. No. 985, 28 p., DOI: 10.3390/rs12060985.
7. Bellassen V., Luyssaert S., Carbon sequestration: Managing forests in uncertain times, *Nature*, 2014, Vol. 506, No. 7487, pp. 153–155, DOI: 10.1038/506153a.
8. 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, Art. No. 814, 10 p., DOI: 10.3390/f13050814.
9. Chazdon R. L., Broadbent E. N., Rozendaal D. M. A., Bongers F., Zambrano A. M. A., Aide T. M., Balvanera P., Becknell J. M., Boukili V., Brancalion P. H. S., Craven D., Almeida-Cortez J. S., Cabral G. A. L., Jong Ben de, Denslow J. S., Dent D. H., DeWalt S. J., Dupuy J. M., Durán S. M., Espírito-Santo M. M., Fandino M. C., César R. G., Hall J. S., Hernández-Stefanoni J. L., Jakovac C. C., Junqueira A. B., Kennard D., Letcher S. G., Lohbeck M., Martínez-Ramos M., Massoca P., Meave J. A., Mesquita R., Mora F., Muñoz R., Muscarella R., Nunes Y. R. F., Ochoa-Gaona S., Orihuela-Belmonte E., Peña-Claros M., Pérez-García E. A., Piotto D., Powers J. S., Rodríguez-Velazquez J., Romero-Pérez I. E., Ruíz J., Saldarriaga J. G., Sanchez-Azofeifa A., Schwartz N. B., Steininger M. K., Swenson N. G., Uriarte M., Breugel M., Wal H., Veloso M. D. M., Vester H., Vieira I. C. G., Bents T. V., Williamson G. B., Poorter L., Carbon sequestration potential of second-growth forest regeneration in the Latin American tropics, *Science Advances*, 2016, Vol. 2, No. 5, Art. No. e1501639, 10 p., DOI: 10.1126/sciadv.1501639.
10. Dobson M. C., Ulaby F. T., LeToan T., Beaudoin A., Kasischke E. S., Christensen N., 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.

11. Gorelick N., Hancher M., Dixon M., Ilyushchenko S., Thau D., Moore R., 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.
12. Huffman G.J., Stocker E.F., Bolvin D.T., Nelkin E.J., Tan J., *GPM IMERG Final Precipitation L3 Half Hourly 0.1 degree × 0.1 degree V06*, Greenbelt, MD: Goddard Earth Sciences Data and Information Services Center (GES DISC), 2020, DOI: 10.5067/Gpm/Imerg/3b-Hh/06 (accessed 24.05. 2022).
13. Jiang M., Medlyn B.E., Drake J.E., Duursma R.A., Anderson I.C., Barton C.V.M., Boer M.M., Carrillo Y., Castañeda-Gómez L., Collins L., Crou K.Y., De Kauwe M.G., dos Santos B.M., Emmerson K.M., Facey S.L., Gherlenda A.N., Gimeno T.E., Hasegawa S., Johnson S.N., Kännaste A., Macdonald C.A., Mahmud K., Moore B.D., Nazaries L., Neilson E.H.J., Nielsen U.N., Niinemets U., Noh N.J., Ochoa-Hueso R., Pathare V.S., Pendall E., Pihlblad J., Piñeiro J., Powell J.R., Power S.A., Reich P.B., Renchon A.A., Riegler M., Rinnan R., Rymer P.D., Salomón R.L., Singh B.K., Smith B., Tjoelker M.G., Walker J.K.M., Wujeska-Klaue A., Yang J., Zaehle S., Ellsworth D.S., 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.
14. Kobayashi S., Omura Y., Sanga-Ngoie K., Widyorini R., Kawai S., Supriadi B., Yamaguchi Y., Characteristics of Decomposition Powers of L-Band Multi-Polarimetric SAR in Assessing Tree Growth of Industrial Plantation Forests in the Tropics, *Remote Sensing*, 2012, Vol. 4, No. 10, pp. 3058–3077, DOI: 10.3390/rs4103058.
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., Mitchell A., Zhou Z.-S., Held A., Milne T., Tapley I., 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., Lawless A.S., Morison J.I., Nichols N.K., Wilkinson M., Quaife T.L., 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., Poulter B., Arneeth A., Haverd V., Calle L., Role of forest regrowth in global carbon sink dynamics, *Proceedings of the National Academy of Sciences*, 2019, Vol. 116, No. 10, pp. 4382–4387, DOI: 10.1073/pnas.1810512116.
19. Rees W.G., Tomaney J., Tutubalina O., Zharko V., Bartalev S., Estimation of Boreal Forest Growing Stock Volume in Russia from Sentinel-2 MSI and Land Cover Classification, *Remote Sensing*, 2021, Vol. 13, No. 21, Art. No. 4483, DOI: 10.3390/rs13214483.
20. Santoro M., Cartus O., Mermoz S., Bouvet A., Le Toan T., Carvalhais N., Rozendaal D., Herold M., Avitabile V., Quegan S., Carreiras J., Rauste Y., Balzter H., Schmullius C., Seifert F.M., *GlobBiomass — global above-ground biomass and growing stock volume datasets*, 2018, available at <http://globbiomass.org/products/global-mapping/> (accessed 24.05. 2022).
21. Small D., Flattening Gamma: Radiometric Terrain Correction for SAR Imagery, *IEEE Trans. Geoscience and Remote Sensing*, 2011, Vol. 49, No. 8, pp. 3081–3093, DOI: 10.1109/TGRS.2011.2120616.
22. Yu Y., Saatchi S., Sensitivity of L-Band SAR Backscatter to Aboveground Biomass of Global Forests, *Remote Sensing*, 2016, Vol. 8, No. 6, Art. No. 522, DOI: 10.3390/rs8060522.