

Т. Н. Чимитдоржиев¹, А. В. Дмитриев¹, Ж. Д. Номшиев¹*

Радиолокационный мониторинг залесения с использованием декомпозиции Клауда-Потье для двойной поляризации

¹ Институт физического материаловедения СО РАН, г. Улан-Удэ, Российская Федерация
* e-mail: tchimit@ipms.bsnet.ru

Аннотация. В работе рассмотрены возможности радиолокационного мониторинга процесса залесения на основе декомпозиции Клауда-Потье временных рядов данных L-диапазона с двойной поляризацией. Предварительная сегментация изображений производится на основе минимальных значений обратного радарного рассеяния за весь период наблюдений. Это позволяет выделить в отдельный класс безлесные участки и редколесье, как существовавшие до начала исследования, так и образовавшиеся позднее. Далее выполняется поляриметрическая декомпозиция методом Клауда-Потье для получения параметров H (энтропия) и α (угол рассеяния) и формирования из них временных рядов. Исследования показали принципиальную возможность мониторинга динамики залесения на плоскости H - α , где точки тестовых участков образуют характерные временные треки. В качестве контрольного для оценки скорости изменений на плоскости H - α использован зрелый плотный лес, характеристики которого считаются постоянными.

Ключевые слова: спутниковая радиолокация, H - α разложение Клауда-Потье, двойная поляризация, временные ряды, залесение

T. N. Chimitdorzhiev¹, A. V. Dmitriev¹, Zh. D. Nomshiev¹*

Afforestation estimation using Cloude-Pottier decomposition of dual polarization SAR data

¹ Institute of Physical Materials Science, SB RAS, Ulan-Ude, Russian Federation
* e-mail: tchimit@ipms.bsnet.ru

Abstract. Assessment of the processes of afforestation and restoration of forests after fires is relevant for a significant territory of Russia, including the problem of carbon neutrality. The paper considers the possibilities of synthetic aperture radar (SAR) monitoring of the afforestation process based on the Cloude-Pottier decomposition of L-band data time series with dual polarization. Preliminary segmentation is based on the minimum values of the radar backscatter over the entire observation period. This makes it possible to distinguish treeless areas and sparsely wooded areas into a separate class, both existing before the start of the study and formed later. Next, Cloude-Pottier polarimetric decomposition is performed to obtain the parameters H (entropy) and α (scattering angle) and form time series from them. Studies have shown the principal possibility of afforestation dynamics monitoring on the H - α plane, where the points of the test areas form characteristic time tracks. A mature dense forest, whose characteristics are considered permanent, was used as a reference for estimating the changes rate on the H - α plane.

Keywords: satellite radar, Cloude-Pottier H - α decomposition, dual polarization, time series, afforestation

Введение

Одним из эффективных инструментов дистанционных измерений биофизических параметров леса являются поляриметрические радиолокаторы с синтезированной апертурой (РСА), которые позволяют получить достаточно полную информацию о состоянии и изменениях лесной растительности [1], в т.ч. для борельных лесов Сибири [2]. Для оценки леса более эффективно использовать радиолокационные данные L-диапазона, поскольку в большинстве случаев радиолокационный эхо-сигнал проникает под лесной полог и отражается обратно от подстилающей поверхности [2]. При этом происходит многократное рассеяние радарного эхо-сигнала от стволов и ветвей деревьев. В случае лесного подроста, увеличение обратного радарного рассеяния в направлении на радар показывает увеличение размеров и густоты молодого леса [3-5]. Ранее авторами в [4], на примере соснового подроста, было показано устойчивое возрастание величины обратного радиолокационного рассеяния неоднородностями леса на согласованной горизонтальной поляризации в L-диапазоне длин волн и последующее возникновение эффекта «насыщения», Данный эффект выражается в том, что обратное рассеяние от лесной среды возрастает до некоторого предела, связанного с величины надземной биомассы леса, и в дальнейшем перестает расти.

К настоящему времени разработано множество методов и алгоритмов анализа полностью поляриметрических радарных изображений, например [6-8]. Однако, для данных с двойной поляризацией в известной нам литературе предложена только декомпозиция Клауда-Потье [9] (декомпозиция $H-\alpha$), которая, как было показано в работе [10], малоэффективна для классификация природных объектов по физическим механизмам рассеяния в таком случае.

Тем не менее можно предположить, что с ростом лесной растительности параметры H и α разложения Клауда-Потье будут также последовательно расти вдоль кривой, ограничивающей область их допустимых значений. Данное обстоятельство было использовано в работе [11], в которой декомпозиция Клауда-Потье данных РСА Sentinel-1 (С-диапазон, длина волны 5,6 см) с двойной поляризацией VV-VH была использована с целью извлечения дополнительного параметра, позволившего провести классификацию с обучением для различных сельскохозяйственных культур.

Целью данной работы является оценка возможностей декомпозиции Клауда-Потье спутниковых радиолокационных данных с двойной поляризацией HH и HV в L-диапазоне длин волн для мониторинга залесения/лесовосстановления.

Описание тестового полигона и используемые данные

В качестве тестового полигона использован участок залесения сосновыми насаждениями в прибрежной части озера Байкал (рис. 1а). Он относится к категории земель сельскохозяйственного назначения. Его подробное описание приведено в работе [4]. В последние десятилетия прошлого века данная местность не обрабатывалась. С начала 2000-х гг. начался интенсивный рост соснового мо-

лодняка, состояние которого на лето 2007 г., показано на рис. 1а. На рис. 1а подрост хвойных пород выделяется более ярким красным цветом на фоне темно красного зрелого соснового леса.

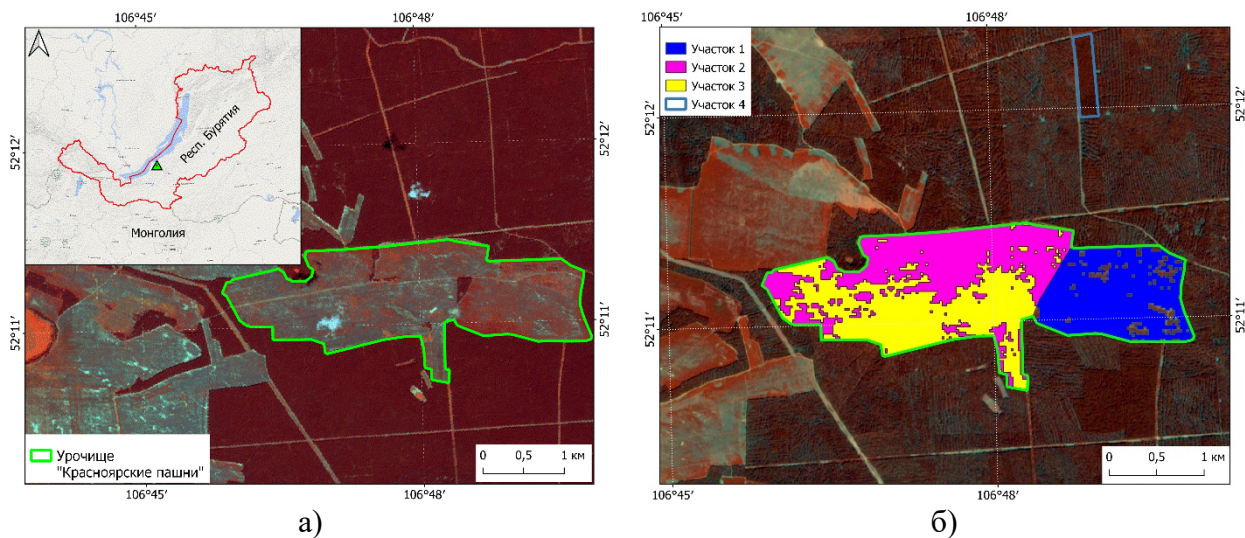


Рис. 1. а) - Расположение тестового полигона и его состояние на изображении мультиспектральной камеры ALOS-1 AVNIR-2 от 16.07.2007 г. (каналы 4-2-1); б) - результаты сегментации тестового полигона по значениям интенсивности обратного радарного рассеяния.

Для исследования использованы временные ряды данных спутниковых радиолокаторов ALOS-1 PALSAR-1 и ALOS-2 PALSAR-2 на восходящей орбите в режиме FBD (Fine Beam Dual, разрешение 10м/пиксель) на согласованной горизонтальной (HH) и кросс-поляризациях (HV), полученные в сезон положительных среднесуточных температур. Изображения получены в L-диапазоне (длина волны излучения 24 см). Углы падения составляли 37.2° и 33.2° для PALSAR-1 и PALSAR-2 соответственно. Изображения PCA ALOS-1 PALSAR-1 охватывали период с 11.07.2007 по 03.09.2009 (11 сцен), а ALOS-2 PALSAR-2 - период с 01.09.2014 по 15.06.2020 (7 сцен).

Выделение участков лесного подроста по степени плотности древостоя

Как было показано ранее в [4], залесение тестового полигона происходило неравномерно, что визуально можно наблюдать и на рис. 1а. Первой интенсивно начала зарастать восточная часть – Участок 1, обозначенная синим полигоном на рис. 1б. Затем - западная часть, на которой наблюдается различие в плотности молодняка, а также наличие не зарастающих мест. Поэтому, для уменьшения ошибок при поляриметрическом анализе лесного подроста, необходимо предварительно сегментировать тестовый полигон, по возможности исключая безлесные участки. Для этого было получено и проанализировано изображение, значения пикселей которого представляли собой минимальные значения интенсивности обратного радарного рассеяния на кросс-поляризации из всего временного

ряда данных. Это позволило выделить в один класс пиксели с наиболее низкими величинами обратного радарного рассеяния - безлесные участки, которые затем были исключены из рассмотрения. В другой класс попадают фрагменты с наибольшими значениями обратного радарного рассеяния – молодой плотный лес, расположенный в западной части тестового полигона (Участок 2 - пурпурные полигоны). Также выделяется класс с промежуточными величинами минимальной интенсивности, представляющий собой лесной подрост, не формирующий сплошной полог, т.е. редколесье (Участок 3 – жёлтые полигоны). Результаты сегментации представлены на рис. 1б. В качестве контрольного участка для сравнения также будем использовать фрагмент зрелого плотного леса, который оставался неизменным на всем протяжении периода наблюдений (Участок 4, синий контур).

Результаты декомпозиции Клауда-Потье данных с двойной поляризацией

Метод Клауда-Потье [6, 9] является математической моделью, которая для данных с полной поляризацией выявляет основной механизм рассеяния из восьми возможных типов. Типы выделяются в соответствии со значениями параметрического угла α и энтропии H , получаемыми из собственных значений матрицы когерентности.

Применение метода Клауда-Потье для случая двойной поляризации впервые было дано в [9], однако в данной работе не было приведено деление на зоны в плоскости H - α . Это было сделано позднее в [10], в которой показано расположение основных механизмов рассеяния в плоскости H - α (при минимальных величинах энтропии) для полной и двойной поляризации. Как было установлено, для двойных поляризаций HH - HV и HV - VV основные механизмы рассеяния не различаются. Более того, в отличие от случая с полной поляризацией, когда границы между зонами на плоскости H - α точно разделяют механизмы рассеяния, в случае с двойной поляризацией зоны перекрываются между собой, а границы сильно размыты. Последнее является причиной того, что однозначная классификация по физическим механизмам рассеяния для случая двойной поляризации невозможна.

Рассмотрим результаты анализа временного ряда данных радаров ALOS-1, -2 PALSAR-1, -2 с согласованной горизонтальной и кросс-поляризациями (HH и HV). Предварительная обработка (импорт, калибровка, фильтрация спекл-шума) и декомпозиция Клауда-Потье были выполнены в программном обеспечении SNAP [12]. Как и следовало ожидать с учётом результатов работы [10], расположение результатов декомпозиции на плоскости H - α всех имеющихся данных (18 изображений) показало существенное взаимное перекрытие. Поэтому для предварительного анализа изменений на тестовых участках результаты применения декомпозиции представлены только за две даты: 11 июля 2007 г. (синий цвет на рис. 2а-в) и 15 июня 2020 г. (оранжевый цвет на рис. 2а-в). Границы зон в плоскости H - α представлены для случая двойной поляризации в соответствии с [10].

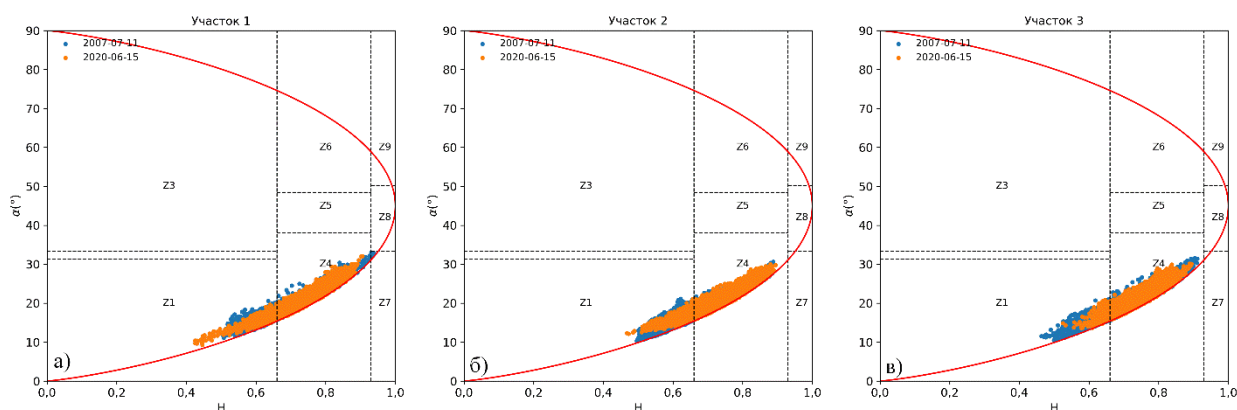


Рис. 2. Результаты декомпозиции для участков залесения а) Участок 1; б) Участок 2; в) Участок 3.

В целом, представленный на рис. 2, результат показывает отсутствие значительных изменений механизмов радарного рассеяния для всех трёх участков. На указанном временном интервале изменения поляриметрических характеристик сравнимы с флуктуациями облака точек тестовых участков. Поэтому анализируем статистические характеристики тестовых участков для результатов, показанных на рис. 4. Для этого определим средние величины, стандартное отклонение S и вариативность $Var(x) = (S_x/\bar{x}) \cdot 100\%$ на участках 1-4 (см. табл. 1).

Таблица 1

Среднее значение, стандартное отклонение и вариативность параметров H и α , а также оценка их значимости.

	Участок 1		Участок 2		Участок 3		Участок 4	
	2007	2020	2007	2020	2007	2020	2007	2020
n	5309		6937		6838		725	
\bar{H}	0,65	0,73	0,63	0,74	0,66	0,75	0,81	0,88
S_H	0,078	0,066	0,068	0,064	0,084	0,047	0,035	0,034
$Var(H)$	12%	9%	11%	9%	13%	6%	4%	4%
Проверка значимости различия \bar{H} и S_H при уровне значимости 0,05								
$Z_{расч} / Z_{крит}$	57,1 / 1,96		98,1 / 1,96		77,3 / 1,96		38,6 / 1,96	
$F_{расч} / F_{крит}$	1,40 / 1,05		1,13 / 1,04		3,19 / 1,04		1,06 / 1,13	
$\bar{\alpha}, ^\circ$	17,46	20,57	16,41	21,04	18,12	21,84	24,98	29,70
$S_\alpha, ^\circ$	3,57	3,13	2,88	3,01	3,81	2,48	2,17	2,47
$Var(\alpha)$	20%	15%	18%	14%	21%	11%	9%	8%
Проверка значимости различия $\bar{\alpha}$ и S_α при уровне значимости 0,05								
$Z_{расч} / Z_{крит}$	47,7 / 1,96		92,6 / 1,96		67,7 / 1,96		38,6 / 1,96	
$F_{расч} / F_{крит}$	1,30 / 1,05		1,05 / 1,04		2,36 / 1,04		1,14 / 1,13	

Результаты, представленные в табл. 1 показывают, что энтропия на участках лесного подроста в среднем возросла на 0,08 – 0,11, на контрольном участке (зрелый лес) на 0,07. Величины разброса (стандартное отклонение и вариативность)

наоборот снизились на 0,004 – 0,037 и на 2 - 6% соответственно, а на контрольном участке не претерпели изменений. Параметр α также демонстрирует увеличение средних значений на 3,11° - 4,63° на участках лесного подроста и на 4,72° на участке зрелого леса.

Для проверки значимости изменений двух средних больших выборок с известными дисперсиями (т.е. изменений на тестовых участках с 2007 г. по 2020 г.), а также изменений дисперсии в математической статистике используются значения статистического критерия $Z_{расч}$ и критерия Фишера $F_{расч}$, которые определяются по следующим формулам:

$$Z_{расч} = \frac{|\bar{x} - \bar{y}|}{\sqrt{S_x^2/n_x + S_y^2/n_y}}; F_{расч} = \frac{S_x^2}{S_y^2}$$

где \bar{x} и \bar{y} – выборочные средние значения, S_x и S_y – стандартные отклонения выборок, n_x и n_y – количество элементов в выборках.

Изменения считаются статистически значимыми при выполнении следующих условий (уровень значимости 0,05):

$$Z_{расч} > Z_{крит} = 1,96; F_{расч} > F_{крит}.$$

Как видно по табл. 1 значимость увеличения средних значений и уменьшение дисперсии энтропии H наблюдается для всех участков за исключением контрольного Участка 4. На Участках 1 и 3 также наблюдается значимое снижение величины разброса и вариации параметра α (на 0,44 – 1,33 и 5 - 10% соответственно). На 2-м и 4-м участках видно слабое увеличение величины разброса и вариации на 0,13-0,30 и на 0-3% соответственно.

Статистика, приведенная в табл. 1 позволяет утверждать, что достаточно равномерно по всем участкам увеличилась хаотичность (энтропия) обратного радарного рассеяния, что является признаком увеличения количества и размера неоднородностей (стволов и ветвей) соизмеримых с длиной волны радиолокационного эхо-сигнала. Стандартное отклонение для энтропии уменьшается для всех участков лесного подроста, что указывает на уменьшение разнообразия характеристик участков залесения. Так это, например, может показывать уменьшение количества и/или площади безлесных фрагментов и редколесья, т.е. участки к 2020 г. более равномерно заросли молодыми насаждениями. В целом такое сравнение достаточно информативно и демонстрирует возможности декомпозиции при рассмотрении усреднённых величин.

Рассмотрим теперь усреднённые по всему тестовому участку результаты декомпозиции Клауда-Потье, предполагая, что это позволит избежать многочисленных наложений/перекрытий облаков точек. Результаты декомпозиции представлены на рис. 3. На всех графиках красным ромбом выделено среднее (за 2007-2020 гг.) значение для контрольного Участка 4. Это значение является некоторым эталоном, к которому постепенно смещаются средние значения энтропии и угла α лесного подроста. Как можно заметить, усреднённые значения для

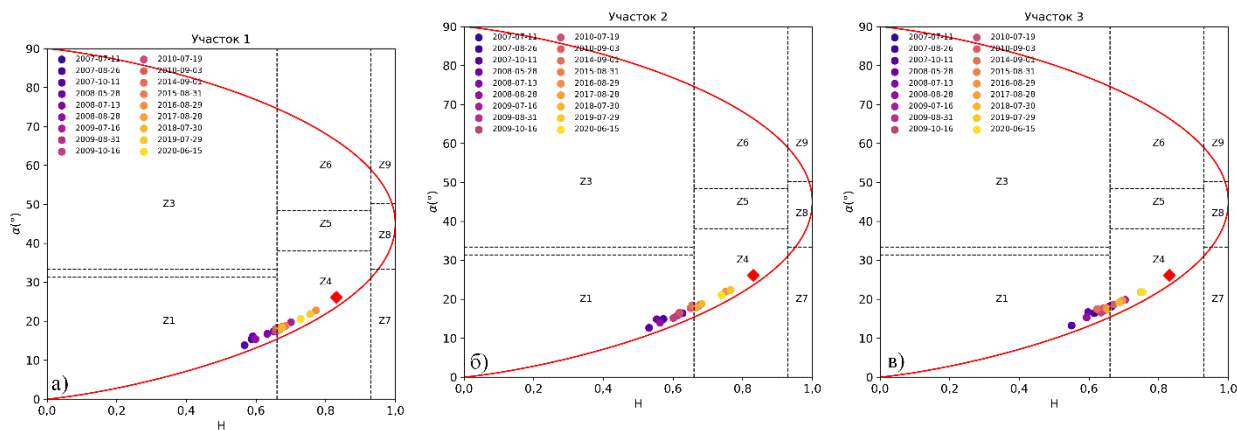


Рис. 3. Результаты декомпозиции временного ряда 2007-2020 гг.

контрольного лесного участка расположены в зоне Z4 (шероховатая поверхность), что противоречит установленному разграничению зон [10] для декомпозиции с двойной поляризацией в плоскости $H-\alpha$. Зрелый лес, как правило, объемно рассеивает радиолокационный эхо-сигнал. Вместе с тем на рис. 3 отмечается определённая динамика при использовании средних величин: со временем отмечается переход из зоны Z1 (слабо шероховатая поверхность) в Z4 (шероховатая поверхность). Подобный результат получен в [11] для оценки роста сельскохозяйственных посевов по данным С-диапазона с двойной согласованной вертикальной и кросс-поляризациями. Таким образом можно утверждать, что наблюдаемая на рис. 3 динамика изменений параметров $H-\alpha$ показывает увеличение размеров элементов молодого подроста, соизмеримых с длиной волны L-диапазона, а также их количества.

Заключение

Анализ результатов поляриметрической декомпозиции Клауда-Потье радиолокационных данных L-диапазона с двойной поляризацией за 11 июля 2007 г. и 15 июня 2020 г. показал, что мониторинг залесения/лесовосстановления на основе классификации по физическим механизмам рассеяния на плоскости $H-\alpha$ невозможен. Поэтому была выполнена статистическая оценка изменений усредненных параметров разложения (энтропии H и угла α) за указанные даты. Эти усредненные параметры показывают значимый рост (уровень значимости 0,05) за период наблюдения. Рассмотрение временного ряда таких средних значений для трех тестовых участков залесения на плоскости $H-\alpha$ выявило следующее: с одной стороны, возможна качественная оценка динамики для всех участков, с другой стороны, все три участка, которые относятся по своим отражательным характеристикам к различным классам залесения, демонстрируют сходную динамику по отношению к участку зрелого плотного леса, принятого в качестве контрольного. В целом, поляриметрическая декомпозиция Клауда-Потье для случая двойной поляризации совместно со статистическим анализом позволяет уверенно выявить динамику залесения/лесовосстановления.

Благодарности

Исследование выполнено при финансовой поддержке проекта РФФ № 22-27-20081.

Авторы благодарны Японскому аэрокосмическому агентству (JAXA) за данные ALOS-1, -2 PALSAR-1, -2, предоставленные в 2018-2021 гг. в соответствии с проектом ALOS-2 RA6 (PI: 3092).

БИБЛИОГРАФИЧЕСКИЙ СПИСОК

1. 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. Geosci. Remote Sens.* 1992. V. 30, № 2. P. 412–415. doi: 10.1109/36.134090
2. 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 ДЗЗ из космоса*. Т. 15, № 4. С. 9–26. doi: 10.21046/2070-7401-2018-15-4-9-24
3. Дмитриев А.В., Чимитдоржиев Т.Н., Дагуров П.Н. Оптико-микроволновая диагностика восстановления леса после пожаров // *Вычислительные Технологии*. 2022. Т. 27, № 2. С. 105–121. doi: 10.25743/ICT.2022.27.2.009
4. Дмитриев А.В., Чимитдоржиев Т.Н., Добрынин С.И., Худайбердиева О.А., Кирбижекова И.И. Оптико-микроволновая диагностика залесения сельскохозяйственных земель // *Современные проблемы ДЗЗ из космоса*. 2022. Т. 19, № 4. С. 168–180. doi: 10.21046/2070-7401-2022-19-4-168-180
5. Bondur V.G., Chimitdorzhiev T.N., Kirbizhekova I.I., Dmitriev A.V. Estimation of Postfire Reforestation with SAR Polarimetry and NDVI Time Series // *Forests*. V. 13. № 5. P. 814. doi: 10.3390/f13050814
6. Cloude S.R., Pottier E. An entropy based classification scheme for land applications of polarimetric SAR // *IEEE Trans. Geosci. Remote Sens.* 1997. V. 35. № 1. P. 68–78. doi: 10.1109/36.551935
7. Freeman A., Durden S.L. A three-component scattering model for polarimetric SAR data // *IEEE Trans. Geosci. Remote Sens.* 1998. V. 36. № 3. P. 963–973. doi: 10.1109/36.673687
8. Yamaguchi Y., Moriyama T., Ishido M., Yamada H. Four-component scattering model for polarimetric SAR image decomposition // *IEEE Trans. Geosci. Remote Sens.* 2005. V. 43. № 8. P. 1699–1706. doi: 10.1109/TGRS.2005.852084
9. Cloude S.R. The dual polarisation entropy/alpha decomposition: a PALSAR case study // *Proc. 3rd International Workshop on Science and Applications of SAR Polarimetry and Polarimetric Interferometry*. Noordwijk, Netherlands: European Space Agency. 2007. P. 6.
10. Ji K., Wu Y. Scattering Mechanism Extraction by a Modified Cloude-Pottier Decomposition for Dual Polarization SAR // *Remote Sensing*. 2015. V. 7. № 6. P. 7447–7470. doi: 10.3390/rs70607447
11. Guo J., Wei P.-L., Liu J., Jin B., Su B.-F., Zhou Z.-S. Crop Classification Based on Differential Characteristics of H/ α Scattering Parameters for Multitemporal Quad- and Dual-Polarization SAR Images // *IEEE Trans. Geosci. Remote Sens.* 2018. V. 56. № 10. P. 6111–6123. doi: 10.1109/TGRS.2018.2832054
12. SNAP [Электронный ресурс], URL: <http://step.esa.int/main/toolboxes/snap/> (дата обращения 30 апреля 2023).

© Т. Н. Чимитдоржиев, А. В. Дмитриев, Ж. Д. Номииев, 2023