

**ФИЗИЧЕСКИЕ ОСНОВЫ
ИССЛЕДОВАНИЯ ЗЕМЛИ ИЗ КОСМОСА**

**ОЦЕНКА ПРОСТРАНСТВЕННОЙ АНИЗОТРОПИИ НЕОДНОРОДНОСТЕЙ
ЛЕСНОЙ РАСТИТЕЛЬНОСТИ ПРИ РАЗЛИЧНЫХ АЗИМУТАЛЬНЫХ УГЛАХ
РАДАРНОГО ПОЛЯРИМЕТРИЧЕСКОГО ЗОНДИРОВАНИЯ**

© 2019 г. В. Г. Бондур^{1*}, Т. Н. Чимитдоржиев^{2**}, А. В. Дмитриев², П. Н. Дагуров²

¹Научно-исследовательский институт аэрокосмического мониторинга «АЭРОКОСМОС», Москва

²Институт физического материаловедения СО РАН, Улан-Удэ

*E-mail: vgbondur@aerocosmos.info

**E-mail: tchimit@gmail.com

Поступила в редакцию 29.04.2019 г.

Обобщены результаты исследований текстуры радарных поляриметрических изображений L и C диапазонов, полученных со спутников SIR-C и ALOS PALSAR-1, для анализа характеристик лесной растительности с использованием различных сигнатур. Предложены и исследованы фрактальная поляризационная сигнатура, позволяющая оценить пространственную анизотропию неоднородностей лесной растительности при различных азимутальных углах радарного зондирования, а также сигнатура лакунарности, на основе анализа которой возможно качественно оценивать угловое распределение ветвей деревьев. С использованием результатов анализа фрактальной размерности и лакунарности при различных состояниях поляризационного эллипса оценены неоднородности лесной растительности на тестовом участке в районе озера Байкал.

Ключевые слова: дистанционное зондирование Земли, радиолокационные изображения, радарная поляриметрия, фрактальная размерность, лакунарность, лесная растительность

DOI: <https://doi.org/10.31857/S0205-96142019392-103>

ВВЕДЕНИЕ

В последние десятилетия отмечается тенденция увеличения количества спутников с оптической и радиолокационной аппаратурой для решения широкого спектра задач космического мониторинга (Shang et al., 2017; Бондур 2010, 2015; Бондур и др., 2015, 2016; Бондур, Савин, 1992; Бондур, Чимитдоржиев, 2008а, б). Важной областью применения космических средств является картирование земных покровов, том числе лесной растительности, подверженных воздействию антропогенных (Бондур, 2010; Бондур, Воробьев, 2015; Бондур и др., 2016) и других деструктивных факторов, например, таких как природные пожары (Бондур, 2011, 2015; Бондур и др., 2016; Бондур, Гордо, 2018) и их последствия (Бондур, 2015; Бондур, Гинзбург, 2015; Lappalainen et al., 2016). Перспективы использования радиолокационных изображений для решения задач исследования лесной растительности обусловлены высокой проникающей способностью радиолокационных эхо-сигналов в исследуемую среду и возможностью съемки в любое время суток и практически при любой погоде.

Как известно, текстура радиолокационных изображений в силу когерентности сигналов и используемых длин волн является уникальным признаком для оценки состояния и динамики различных типов земной поверхности (Бондур, Старченков, 2001; Бондур, Чимитдоржиев, 2008а). Одним из эффективных методов текстурного анализа является фрактальный подход, количественно характеризующий объекты со сложной пространственной структурой (Mandelbrot, 1982). В последние несколько лет интенсивные исследования были направлены на разработку эмпирических методов для оценки фрактальных размерностей спутниковых изображений как природных, так и искусственных поверхностей, созданных человеком. Например, в работе (Di Martino et al., 2018) рассмотрена роль пространственного разрешения радаров спутников Cosmo/SkyMed при построении карт фрактальной размерности природных сред и показано, что использование данных с разрешением на местности 3–5 м является более информативным. Там же отмечено «не фрактальное поведение» урбанизированных территорий в отличие от природных сред. Оценка особенностей текстуры, без фильтрации спекл-шума,

позволила выполнить оценку пространственных изменений (Wang et al., 2016), сегментацию пикселей (Shang et al., 2017) и выявить разрушенные здания (Sun et al., 2016).

Наряду с развитием технологий текстурного анализа радарных данных развиваются другие методы радиолокационного зондирования, такие как интерферометрия, поляриметрия и томография. Значимые результаты получены при комплексном использовании этих методов, например, в поляриметрической томографии (Aghababae, Sahebi, 2018) и поляриметрическом текстурном анализе (Weissgerber et al., 2016). Анализ текстуры путем фрактального анализа используется в интерферометрии для оценки сдвигов и последующего совмещения интерферометрических изображений (Danudirdjo, Hirose, 2013, 2015). По аналогии с указанными выше методами комплексирования можно предположить, что поляриметрический анализ текстуры радиолокационных изображений позволит получить дополнительную информацию об объектах исследования, в том числе лесной растительности.

Одним из методов поляризационного анализа является графическое представление значений коэффициента обратного радарного рассеяния для всех возможных состояний поляризационного эллипса, реализуемое в виде поляризационной сигнатуры (Van Zyl et al., 1987). Последняя является трехмерным графическим отображением поляриметрической информации об обратном радарном рассеянии (яркости поляриметрических радарных изображений): независимые переменные, представляющие собой угол эллиптичности и угол наклона поляризационного эллипса, откладываются по осям абсцисс и ординат, а аппликацией является интенсивность обратного радарного эхосигнала. Такой подход основан на усреднении величин обратного радарного рассеяния для некоторой совокупности соседних пикселей, что неполно представляет сложные явления, сопровождающие

процессы рассеяния и переотражения радиоволн в неоднородных средах. Для оценки степени неоднородности лесной растительности следует оценить пространственные вариации радарного эхосигнала.

В настоящей работе исследуются возможности использования поляризационной фрактальной сигнатуры и поляризационной сигнатуры лакунарности для выявления пространственной анизотропии вариаций яркости пикселей (радарного эхосигнала) поляриметрических радиолокационных изображений в зависимости от таксационных параметров лесной растительности.

ПОСТАНОВКА ЗАДАЧИ И МЕТОДИКА АНАЛИЗА СИГНАТУР

Фрактальный характер природных объектов может проявляться в измерениях различных параметров, описывающих их состояние. Рассмотрим в качестве примера стандартные профили фрагментов радиолокационных изображений, соответствующих лесным массивам и безлесным участкам. На рис. 1 представлены горизонтальные профили радиолокационных сигналов, соответствующих изображению, полученному с помощью аппаратуры спутника ALOS PALSAR-1 на различных поляризациях.

На рис. 1 по оси абсцисс отложены номера пикселей, по оси ординат — величина эффективной поверхности рассеяния (ЭПР) в децибелах. Первая половина профиля на рис. 1 соответствует безлесному участку, вторая половина профиля соответствует лесному массиву. Анализ рис. 1 показывает, что значительные вариации ЭПР наблюдаются как для лесного, так и для безлесного участков. Эти вариации сигналов имеют случайный характер, однако при изменении масштаба шкалы абсцисс можно отметить некоторое статистическое самоподобие изменений сигналов, т.е. самоподобность профилей (а также изображений в целом) на разных масштабах в среднем. Этот факт свидетельствует

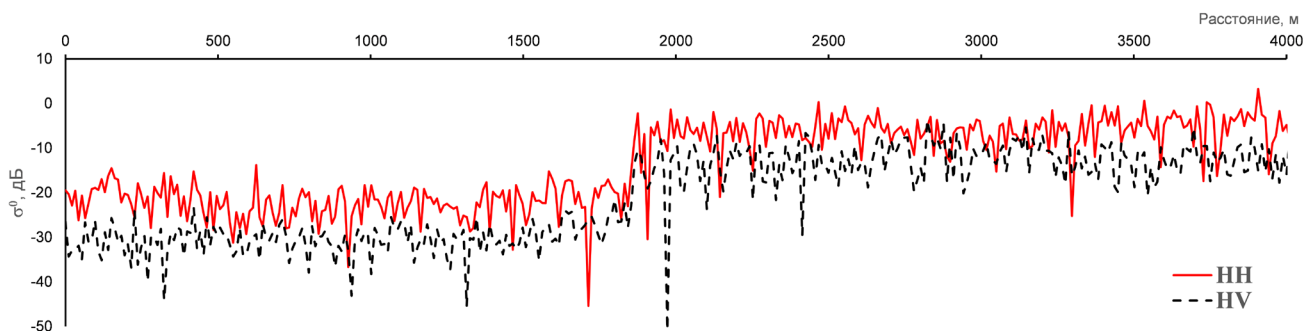


Рис. 1. Профили радиолокационного эхосигнала на HH и HV поляризациях для PCA ALOS PALSAR-1.

о фрактальном характере данного изображения и дает возможность характеризовать исследуемую земную поверхность соответствующей фрактальной размерностью. На основе визуального анализа графиков, приведенных на рис. 1, можно предположить, что для лесных участков фрактальная размерность будет выше, чем для безлесных.

Как правило, геометрические размеры объектов на земной поверхности отличаются в различных направлениях. Соответственно, в процессе рассеяния радиолокационных сигналов от таких объектов интенсивность и вариации интенсивности отраженного сигнала на различных поляризациях и в разных диапазонах длин волн будут существенно зависеть от неоднородности объекта, характеризующей его фрактальной размерностью, что позволит классифицировать природные сообщества и оценивать их характеристики (Бондур, Старченков, 2001).

Радиолокационное изображение или его фрагмент (см., например, рис. 2а), можно представить в трехмерном виде (рис. 2б), где значения аппликаты будут характеризоваться величинами яркости (величинами ЭПР) радарного изображения.

В настоящее время разработано множество различных методов и алгоритмов расчета фрактальных размерностей, которые рассмотрены, например, в работах (Дмитриев и др., 2016; Чимитдоржиев и др., 2007; Dmitriev et al., 2016).

Рассмотрим в качестве сигнатуры радарных изображений лакуарность (Λ), которая также, как и фрактальная размерность введена Мандельбротом и является важным дополнением при анализе

текстуры на основе фрактального подхода (Mandelbrot, 1982; Allain, Cloitre, 1991). Некоторые объекты могут иметь одинаковую фрактальную размерность, при этом обладая различной текстурой. Различить такие объекты и помогает лакуарность (Mandelbrot, 1982). Если рассматривать радарное изображение в трехмерном виде, то лакуарность связана с пространственным распределением размеров промежутков или понижений (впадин). Текстуры с низкой лакуарностью считаются однородными, поскольку все размеры промежутков одинаковы; и наоборот, текстуры с высокой лакуарностью неоднородны. Следует отметить, что текстуры однородные на небольших фрагментах, могут быть неоднородными на более крупных площадях и наоборот. Поэтому Λ можно считать масштабно-зависимой мерой текстуры.

Общий подход к оценке лакуарности состоит в оценке распределения масс заданного множества. Так, в работе (Allain, Cloitre, 1991) был предложен метод скользящих кубов, заключающийся в следующем. Использовался куб радиуса r , скользящий по сетке, покрывающей множество. Пусть $n(M, r)$ число скользящих кубов радиуса r и массы M . Определим функцию вероятности распределения масс $Q(M, r)$ как частное от деления величины $n(M, r)$ на общее число кубов. Тогда лакуарность на масштабе r определяется следующим выражением (Allain, Cloitre, 1991):

$$\Lambda(r) = \frac{\sum_M M^2 Q(M, r)}{\left[\sum_M M Q(M, r) \right]^2}. \quad (1)$$

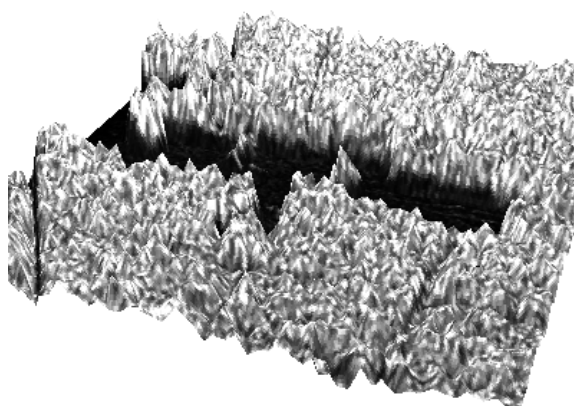
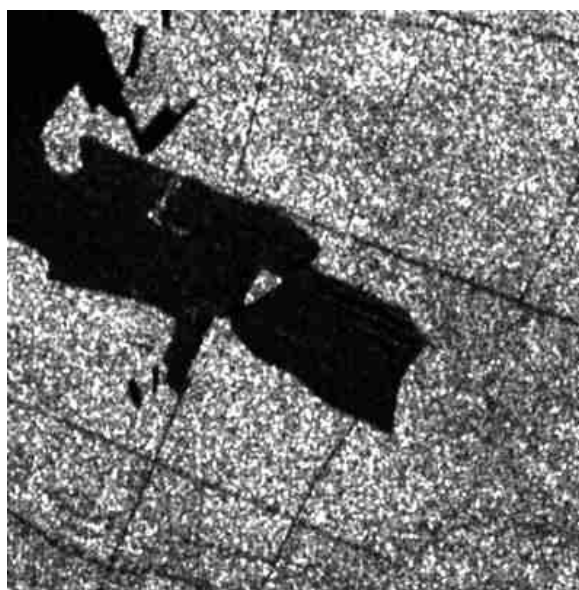


Рис. 2. а — фрагмент радарного изображения в дециметровом диапазоне длин волн; б — его трехмерное представление.

Построение изображений лакуарности производилось в соответствии с алгоритмом, описанным в работе (Dong, 2000). Данный алгоритм основан на разностном методе подсчета кубов. Куб размером $r \times r \times r$ ($r = 2, 3, 4, 5, \dots$) помещается в левом верхнем углу выделенного участка (окна) размером $W \times W$ на исходном изображении. W — нечетное число, удовлетворяющее условию $r < W$.

В зависимости от значений пикселей в скользящем окне размера $r \times r$ может потребоваться колонна высотой более одного куба для того, чтобы покрыть поверхность, составленную из пикселей изображения. Присвоим номера 1, 2, 3, ... кубам начиная с нижнего. Пусть для каждого скользящего окна размера $r \times r$ минимальное и максимальное значения пикселей попадают в куб под номером u и v соответственно. Тогда относительная высота колонны:

$$n_r(i, j) = v - u - 1, \quad (2)$$

где i и j — координаты пиксела.

Когда скользящее окно движется в окне $W \times W$, то имеем

$$M_r = \sum_{i,j} n_r(i, j). \quad (3)$$

Для вычисления лакуарности в окне $W \times W$ масса M в выражении (1) заменяется массой M_r из (3). Далее, значение лакуарности присваивается центральному пикселу данного окна, а само окно движется через все изображение. Блок-схема построения поляризационной сигнатуры лакуарности представлена на рис. 3.

На первом шаге построения лакуарности диапазон изменения углов ориентации ψ и эллиптичности χ поляризационного эллипса разбивается на равные промежутки

$$\psi_i = \psi_{i-1} + \Delta\psi \quad (i = 0, 1, \dots, N; \psi_0 = 0^\circ; \psi_N = 180^\circ) \text{ и} \\ \chi_j = \chi_{j-1} + \Delta\chi \quad (j = 0, 1, \dots, M; \chi_0 = -45^\circ; \chi_M = +45^\circ). \quad (4)$$

Здесь $\Delta\psi$ и $\Delta\chi$ фиксированные шаги изменения углов.

Для каждой комбинации углов (ψ_i, χ_j) в соответствии с работой (Van Zyl et al., 1987) вычисляется соили кросс-поляризационная ЭПР. Затем, рассчитанные ЭПР преобразуются в изображения лакуарности с помощью алгоритма, описанного выше.

На полученных изображениях определяется область, для которой нужно построить сигнатуру. Значения, попадающие в данную область, усредняются для получения результирующей лакуарности. Таким образом, имеем одно значение Λ_{ij} для каждой пары углов (ψ_i, χ_j) . Результирующий набор из $L = (N + 1) \cdot (M + 1)$ точек $(\psi_i, \chi_j, \Lambda_{ij})$ образует поляризационную сигнатуру лакуарности (Dmitriev et al., 2018).



Рис. 3. Блок-схема построения сигнатуры лакуарности.

Для построения сигнатуры лакуарности разработано программное обеспечение на языке программирования C++, которое доступно на GitHub (PolSARSignatures, 2019). Оно основано на Orfeo ToolBox — свободном программном обеспечении для обработки данных дистанционного зондирования (Orfeo ToolBox, 2019).

ОПИСАНИЕ ТЕСТОВОГО ПОЛИГОНА И ЭКСПЕРИМЕНТАЛЬНЫХ ДАННЫХ

В качестве тестового был выбран участок прибрежной зоны озера Байкал (см. рис. 4), представительный с точки зрения разнообразия земных покровов и охватывающий лесные массивы, гористую местность, сельскохозяйственные поля, луга, дельту реки Селенга, болота и часть озера.

В силу высокой проникающей способности радиолокационного эхо-сигнала L-диапазона для исследования были использованы данные космических поляриметрических РСА: спутника SIR-C, выполнявшего съемку в октябре 1994 г., и спутника ALOS, выполнявшего съемку

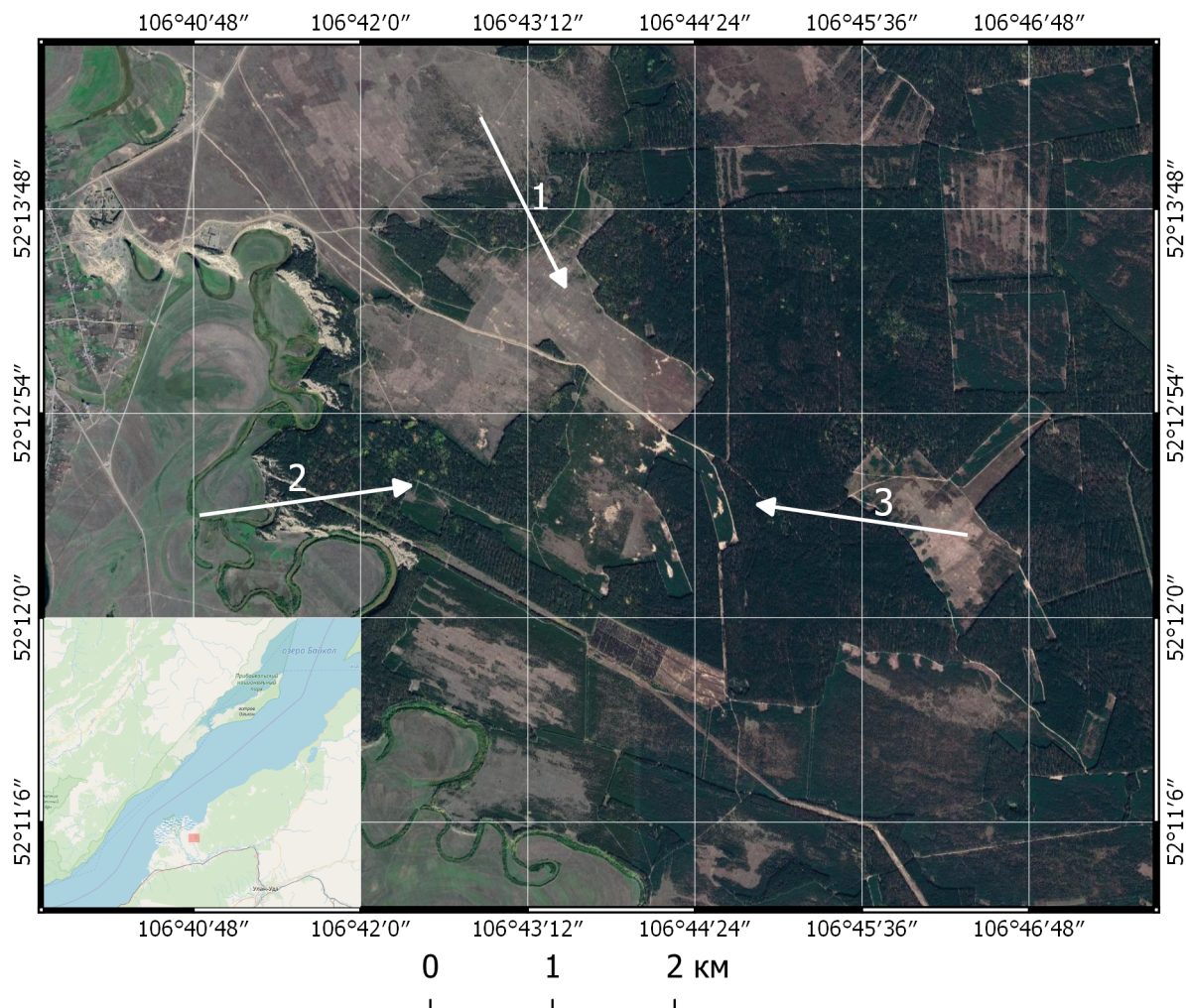


Рис. 4. Изображение тестового участка в прибрежной зоне озера Байкал на картах Google Maps.

в 2006–2009 гг. (табл. 1). Необходимо отметить отсутствие полностью поляриметрических радиолокационных изображений современного спутникового радара L-диапазона ALOS-2 PALSAR-2 для исследуемого тестового участка.

Изображения, полученные PCA SIR-C формировались одновременно в двух частотных диапазонах (L и C с длинами волн $\lambda = 24$ см и $\lambda = 5.6$ см соответственно) на восходящей орбите с углом наклона 62.6° и углом падения волны 23.9° . При этом зондирование выполнялось по направлению на юго-юго-восток (стрелка 1 на рис. 4).

Угол наклона орбиты ALOS PALSAR-1 составляет 98.1° , угол падения радиоволн — 24° ; при зондировании на восходящей орбите направление зондирования близко к восточному (стрелка 2), а на нисходящей орбите направление зондирования изменяется на западное (стрелка 3).

С целью устранения спекл-шума для исходных радиолокационных данных проводилось

некогерентное накопление. В результате размер пиксела на изображениях составил 24×24 м.

Таблица 1. Используемые данные поляриметрических радаров

SIR-C	ALOS PALSAR-1 восходящая орбита	ALOS PALSAR-1 нисходящая орбита
09.10.1994	28.06.2006	30.05.2006
10.10.1994	13.08.2006	15.07.2006
	28.09.2006	30.08.2006
	13.11.2006	15.10.2006
	31.03.2007	
	16.05.2007	
	16.11.2006	
	02.04.2008	
	05.04.2009	

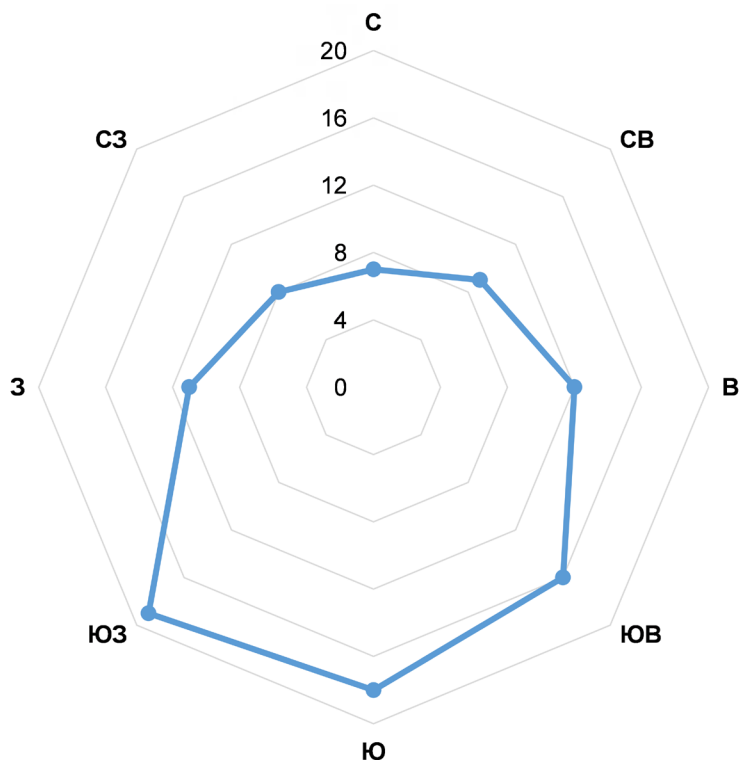


Рис. 5. Результаты наземных измерений азимутального распределения ветвей деревьев.

В качестве тестового полигона для апробации разработанной методики было выбрано несколько лесных кварталов преимущественно соснового леса на равнинной части дельты реки Селенга.

Данные дистанционного зондирования были дополнены картографическими материалами различных масштабов. Кроме того, для классификации лесных массивов использовались материалы лесоустройства с детальным описанием таксационных характеристик каждого выдела.

На пробных выделах было проведено таксационное описание и измерено азимутальное распределение неоднородностей в виде ветвей. На тестовой выборке для каждого из 100 деревьев определялся азимут направления, соответствующего максимальному количеству ветвей. Результаты этих измерений показали, что у 60–75% деревьев наибольшая густота ветвей наблюдается в диапазоне азимутальных углов от юго-востока до юго-запада (см. рис. 5).

Была выполнена также визуальная оценка наклона ветвей деревьев: распределение в промежутке углов $0^\circ \div 180^\circ$ от горизонтали. В средней части стволов преимущественные наклоны крупных ветвей составляли $10^\circ \div 50^\circ$. Вообще, структура наклонов ветвей в вертикальной плоскости достаточно разнообразна и зависит от локальной плотности деревьев.

РЕЗУЛЬТАТЫ ИССЛЕДОВАНИЙ И ИХ АНАЛИЗ

На рис. 6 представлены классические сополяризованные сигнатуры (*a*, *b*, *v*), характеризующие усредненные, в определенном «окне», величины обратного радарного рассеяния.

Также построены сополяризованные сигнатуры:

- на основе второго момента (*g*, *d*, *e*);
- с использованием фрактального анализа — фрактальной размерности (*ж*, *з*, *и*) (Dmitriev et al., 2016) и лакунарности (*к*, *л*, *м*) (Dmitriev et al., 2018).

Они описывают пространственные вариации яркости радиолокационных изображений, по сути пространственные вариации сигналов обратного радарного рассеяния.

На рис. 6 по оси абсцисс отложен угол ориентации эллипса поляризации, по оси ординат — угол эллиптичности, по оси аппликат для классической сигнатуры — усредненная нормированная величина обратного радарного рассеяния, для фрактальной — фрактальная размерность, а также соответственно нормированная величина второго момента и величина лакунарности. Представленные сигнатуры получены усреднением данных отдельно для трех направлений радиолокационного зондирования.

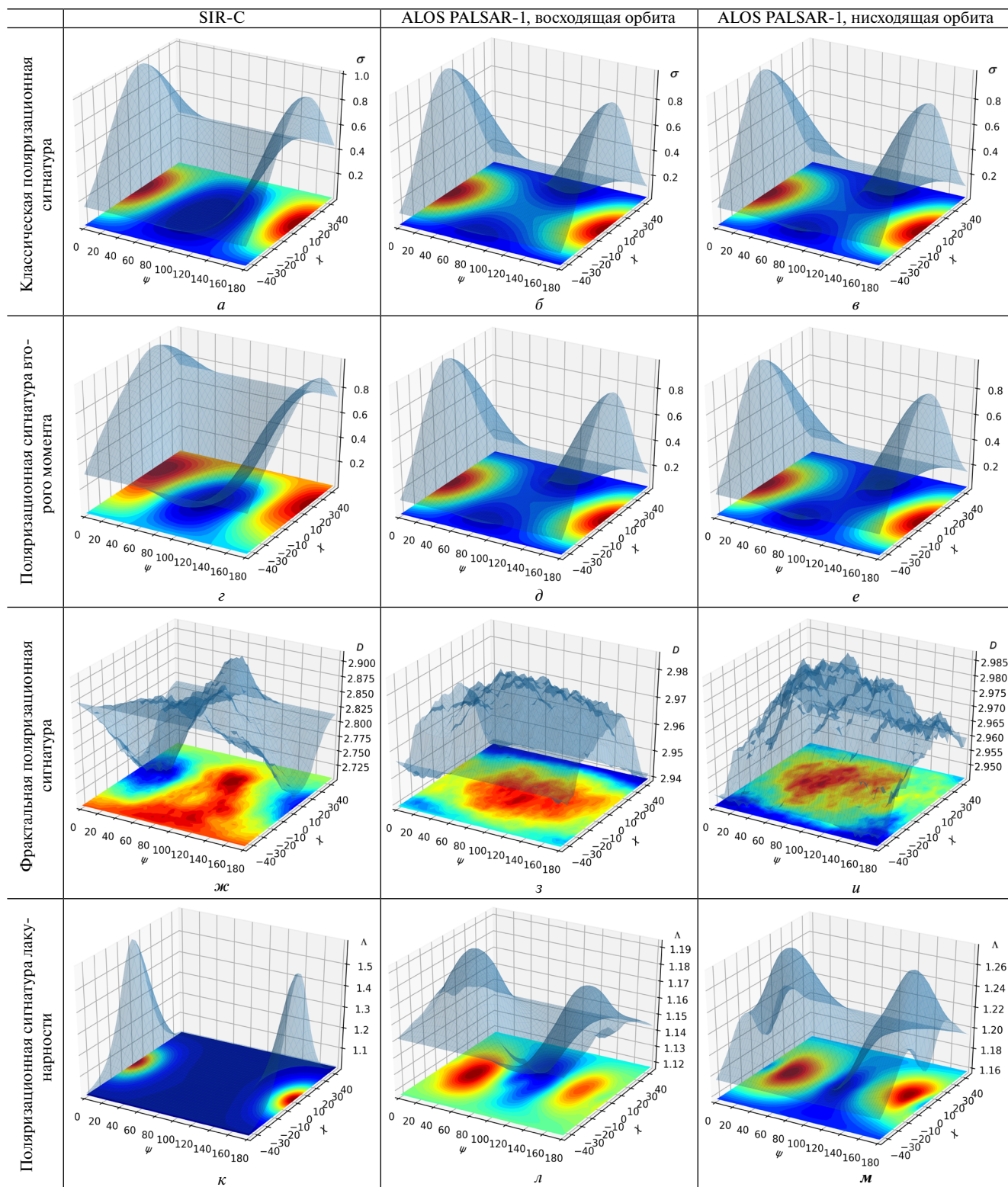


Рис. 6. Сополаризованные сигнатуры: *a–в* — классические, *г–е* — сигнатуры второго момента, *ж–и* — фрактальные, *к–м* — лакуарности для различных орбит.

Традиционные поляризационные сигнатуры (см. рис. 6 *a–в*), полученные для трех различных направлений зондирования сходны по форме и соответственно одинаково характеризуют

усредненное поляриметрическое радарное рассеяние тестовым участком леса. Сигнатуры второго момента (см. рис. 6 *г–е*) аналогичны традиционным и также сходны для трех случаев

зондирования. Представленные традиционные поляризационные и сигнатуры второго момента являются хорошо изученными сигнатурами, характерными для двухгранного уголкового отражателя (VanZyl et al., 1987).

Рассмотрим фрактальную сигнатуру в зависимости от угла наклона поляризации, полагая что зависимость от угла эллиптичности симметрична относительно линейной поляризации (0° по оси ординат). Как отмечалось ранее в работе (Чимитдоржиев Т.Н. и др., 2007) фрактальная сигнатура, полученная по данным SIR-C (рис. 6ж), имеет симметричное распределение относительно угла наклона поляризации 90° , который соответствует вертикальной согласованной поляризации.

Значения фрактальной размерности более 2.85 (Бондур, Чимитдоржиев, 2008а) соответствуют значительным пространственным флуктуациям радиолокационного эхо-сигнала. При этом эти флуктуации коррелируют с пространственным распределением неоднородностей в виде стволов и крупных ветвей деревьев (Бондур, Чимитдоржиев, 2008а). Определенная симметричность сигнатуры относительно угла ориентации эллипса 90° (вертикальная поляризация), по-видимому, связана с аналогичным распределением ветвей с западной и восточной стороны деревьев

при зондировании в южном направлении (в случае SIR-C).

Для радиолокационных изображений, полученных с борта спутника ALOS PALSAR-1 при зондировании на восходящей орбите, т.е. в направлении на восток, получена фрактальная размерность более 2.97 в диапазоне изменения углов наклона эллипса поляризации $90^\circ \div 170^\circ$ (см. рис. 6з), т.е. наблюдается увеличение пространственных вариаций интенсивности обратного радарного рассеяния. При данной геометрии зондирования (см. стрелка 2 на рис. 4), когда нулевой угол ориентации эллипса поляризации совпадает с направлением на юг, подобное угловое распределение свидетельствует о том, что с южной стороны деревьев ветви образуют более густой слой отражения, а с северной стороны ветви располагаются реже, т.е. наблюдается анизотропия пространственного распределения ветвей.

Напротив, на нисходящих орбитах при зондировании в сторону запада (нулевой угол ориентации эллипса поляризации совпадает с направлением на север) увеличение пространственных вариаций наблюдается при углах ориентации эллипса поляризации $20^\circ \div 90^\circ$ (рис. 6и). Это также может быть обусловлено большей густотой ветвей, растущих в южную сторону.

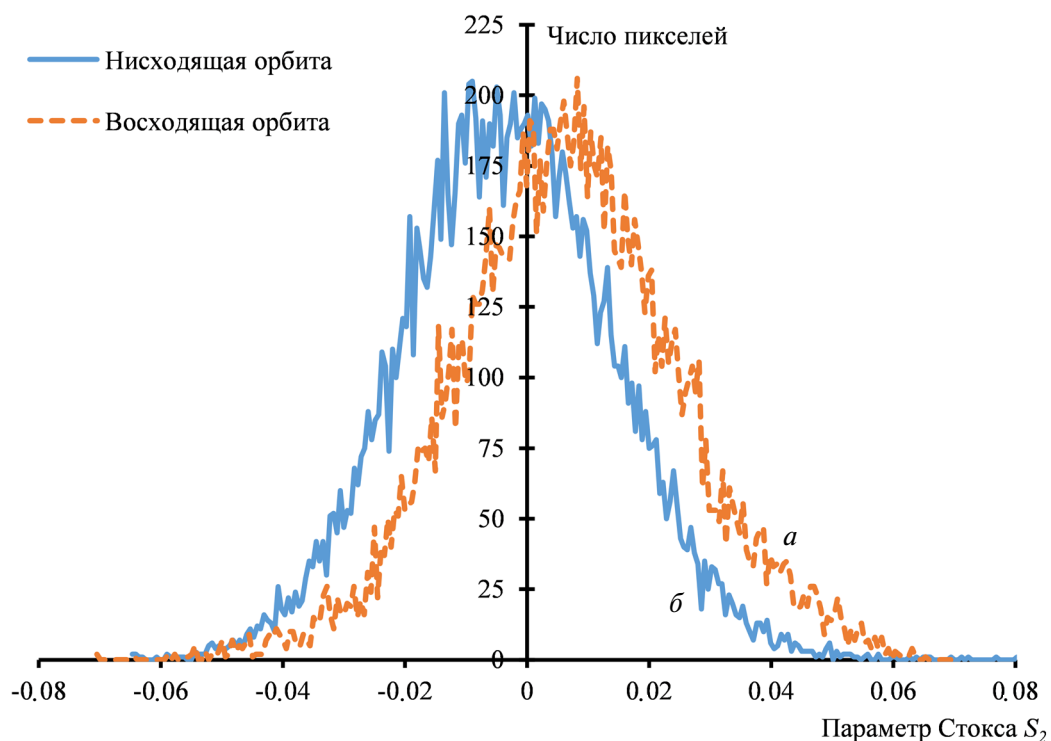


Рис. 7. Гистограммы распределения третьего параметра Стокса для тестового участка леса: а — восходящая орбита (дата съемки: 28.09.2006), б — нисходящая орбита (дата съемки: 30.08.2006).

Сравним полученные выше результаты с использованием данных спутника ALOS PALSAR, с одним из традиционных способов оценки состояния поляризации. Рассмотрим гистограммы распределения значений 3-го параметра Стокса по изображениям тестового участка (см. рис. 7). Третий параметр Стокса S_2 характеризует соотношение компонент, линейно поляризованных под углами (с азимутами) $+45^\circ$ или -45° . Существуют следующие три случая для величин S_2 :

- 1) $S_2 > 0$, то волна поляризована преимущественно с азимутом $+45^\circ$,
- 2) $S_2 < 0$, то волна поляризована преимущественно с азимутом -45° ,
- 3) $S_2 = 0$, то в волне не преобладает ни одна из этих двух поляризаций.

Расчет изображений параметров Стокса выполнен с использованием программы PolSARpro version 5.0.4 при размере окна 5×5 .

Гистограмма для восходящей орбиты, приведенная на рис. 7, демонстрирует некоторое преобладание положительных значений 3-го параметра Стокса, т.е. компонента линейно поляризованного обратного радарного рассеяния с углом наклона $+45$ градусов больше чем компонента с углом наклона поляризации -45 градусов.

При геометрии зондирования характерной для восходящей орбиты (стрелка 2 на рис. 4) это может свидетельствовать о большей деполяризации и большем количестве элементарных рассеивателей, расположенных под углом 45° с южной стороны деревьев.

Превалирование отрицательных величин в гистограмме для нисходящей орбиты является показателем преобладания компоненты радарного рассеяния с углом наклона -45 градусов. Однако зондирование осуществляется в противоположную сторону (стрелка 3), поэтому в целом можно говорить о наличии большего количества рассеивателей под углом 45 градусов в южном направлении, что подтверждает результаты, полученные при помощи фрактальной поляризационной сигнатуры.

Сигнатура лакуарности, представленная на рис. 6 *к-м*, также демонстрирует некоторую асимметричность относительно угла наклона 90 градусов, что особенно заметно для случая восходящей орбиты. Это подтверждает описанный выше эффект азимутальной анизотропии неоднородностей леса. Помимо этого, площадные максимумы красного цвета (см. рис. 6) могут характеризовать так называемую «степень заполняемости» пространства и соответствовать углам наклона ветвей деревьев.

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Приведены результаты анализа текстуры радиолокационных поляриметрических изображений (L и C диапазоны) лесной растительности с использованием представления пространственных вариаций величины обратного радарного рассеяния в виде поляризационных сигнатур: второго момента, фрактальной и лакуарности. На основе графического представления поляризационных сигнатур проведена сравнительная оценка их возможностей для оценки неоднородностей лесной растительности в трех азимутальных направлениях, соответствующих наклонному радиолокационному зондированию, ориентированному с севера на юг, с запада на восток и с востока на запад.

Предложенная новая поляризационная сигнатура для учета пространственных вариаций обратного радарного рассеяния — лакуарность, в отличие от фрактальной сигнатуры, характеризует степень неоднородности пространственных вариаций регистрируемых сигналов. Поляриметрическая сигнатура лакуарности позволяет определить «степень заполняемости» пространства, которая используется при анализе лесной растительности. Данная характеристика является дополнительной к сигнатуре фрактальной размерности. В целом такие сигнатуры более полно описывают пространственные вариации обратного радарного рассеяния лесной растительности при различных состояниях поляризационного эллипса.

Данные ALOS PALSAR-1 и ALOS-2 PALSAR-2 предоставлены японским аэрокосмическим агентством JAXA в рамках проекта ALOS-2 RA-6 (PI 3402 и PI 3092).

ИСТОЧНИК ФИНАНСИРОВАНИЯ

Работа выполнена в рамках апробации методов и технологий, разрабатываемых по государственному заданию ИФМ СО РАН, а также при финансовой поддержке Минобрнауки России (уникальный идентификатор проекта RFMEFI58317X0061).

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

- Бондур В.Г.* Аэрокосмические методы и технологии мониторинга нефтегазоносных территорий и объектов нефтегазового комплекса // Исследование Земли из космоса. 2010. № 6. С. 3–17.
- Бондур В.Г.* Космический мониторинг природных пожаров в России в условиях аномальной жары 2010 г. // Исследование Земли из космоса. 2011. № 3. С. 3–13.

- Бондур В.Г.* Космический мониторинг эмиссий малых газовых компонент и аэрозолей при природных пожарах в России // Исследование Земли из космоса. 2015. № 6. С. 21–35. doi: 10.7868/S0205961415060032
- Бондур В.Г., Воробьев В.Е.* Космический мониторинг импактных районов Арктики // Исследование Земли из космоса. 2015. № 4. С. 4–24. DOI: 10.7868/S0205961415040028
- Бондур В.Г., Воробьев В.Е., Лукин А.А.* Космический мониторинг состояния северных территорий, нарушенных нефтедобычей // Исследование Земли из космоса. 2016. № 6. С. 35–44. DOI: 10.7868/S0205961416060014
- Бондур В.Г., Гинзбург А.С.* Эмиссия углеродсодержащих газов и аэрозолей от природных пожаров на территории России по данным космического мониторинга // Доклады академии наук. 2016. Т. 466. № 4. С. 473–477. DOI: 10.7868/S0869565216040186
- Бондур В.Г., Гордо К.А.* Космический мониторинг площадей, пройденных огнем, и объемов эмиссий вредных примесей при лесных и других природных пожарах на территории Российской Федерации // Исследование Земли из космоса. 2018. № 3. С. 41–55. DOI: 10.7868/S020596141803003X
- Бондур В.Г., Гордо К.А., Кладов В.Л.* Пространственно-временные распределения площадей природных пожаров и эмиссий углеродсодержащих газов и аэрозолей на территории северной Евразии по данным космического мониторинга // Исследование Земли из космоса. 2016. № 6. С. 3–20. DOI: 10.7868/S0205961416060105
- Бондур В.Г., Савин А.И.* Концепция создания систем мониторинга окружающей среды в экологических и природно-ресурсных целях // Исследование Земли из космоса. 1992. № 6. С. 70–78.
- Бондур В.Г., Старченков С.А.* Методы и программы обработки и классификации аэрокосмических изображений // Известия высших учебных заведений. Геодезия и аэрофотосъемка. 2001. № 3. С. 118–143.
- Бондур В.Г., Чимитдоржиев Т.Н.* Анализ текстуры радиолокационных изображений растительности // Известия высших учебных заведений. Геодезия и аэрофотосъемка. 2008. № 5. С. 9–14.
- Бондур В.Г., Чимитдоржиев Т.Н.* Дистанционное зондирование растительности оптико-микроволновыми методами // Известия высших учебных заведений. Геодезия и аэрофотосъемка. 2008. № 6. С. 64–73.
- Дмитриев А.В., Чимитдоржиев Т.Н., Дагуров П.Н.* Новый тип поляризационной сигнатуры для радиолокационных изображений земных покровов с фрактальными свойствами // Автометрия. 2016. Т. 52. № 3. С. 37–44.
- Чимитдоржиев Т.Н., Архинчеев В.Е., Дмитриев А.В., Цыдыпов Б.З.* Фрактальный анализ поляризметрических радиолокационных данных // Исследование Земли из космоса. 2007. № 4. С. 27–33.
- Aghababae H., Sahebi M.R.* Model-Based Target Scattering Decomposition of Polarimetric SAR Tomography // IEEE Transactions on Geoscience and Remote Sensing. 2018. V. 56. № 2. P. 972–983.
- Allain C., Cloitre M.* Characterizing the lacunarity of random and deterministic fractal sets // Physical review A. 1991. V. 44. № 6. P. 3552.
- Danurdirdjo D., Hirose A.* InSAR Image Regularization and DEM Error Correction With Fractal Surface Scattering Model // IEEE Transactions on Geoscience and Remote Sensing. 2015. V. 53. № 3. P. 1427–1439.
- Danurdirdjo D., Hirose A.* Local Subpixel Coregistration of Interferometric Synthetic Aperture Radar Images Based on Fractal Models // IEEE Transactions on Geoscience and Remote Sensing. 2013. V. 51. № 7. P. 4292–4301.
- Di Martino G., Iodice A., Riccio D., Ruello G., Zinno I.* The Role of Resolution in the Estimation of Fractal Dimension Maps From SAR Data // Remote Sensing. 2018. V. 10. № 1. P. 9.
- Dmitriev A.V., Chimitdorzhiev T.N., Dagurov P.N.* Fractal polarization signature of radar backscattering variations // 2016 IEEE International Geoscience and Remote Sensing Symposium (IGARSS). 2016. P. 4972–4975. DOI: 10.1109/IGARSS.2016.7730297
- Dmitriev A.V., Chimitdorzhiev T.N., Dagurov P.N.* Polarization Signature of Lacunarity for Heterogeneity Estimation of Radar Backscattering from Pine Forest // IGARSS2018–2018 IEEE International Geoscience and Remote Sensing Symposium. 2018. P. 5326–5329. DOI: 10.1109/IGARSS.2018.8518498
- Dong P.* Test of a new lacunarity estimation method for image texture analysis. // Int. J. Remote Sens. 2000. T. 21, № 17. P. 3369–3373.
- Lappalainen H.K., Kerminen V.-M., Petäjä T., ... Bondur V. et al.* Pan-Eurasian Experiment (PEEX): Towards a holistic understanding of the feedbacks and interactions in the land–atmosphere–ocean–society continuum in the Northern Eurasian region // Atmos. Chem. Phys., 2016. V. 16. P. 14421–14461, doi:10.5194/acp-16-14421-2016
- Mandelbrot B.B.* The fractal geometry of nature. New York: W.H. Freeman and Co. 1983. 495 p.
- Myint S.W., Mesev V., Lam N.* Urban textural analysis from remote sensor data: Lacunarity measurements based on the differential box counting method // Geographical Analysis. 2006. T. 38. № 4. P. 371–390.
- Orfeo ToolBox (OTB)* [Электронный ресурс]. URL: <https://www.orfeo-toolbox.org/> (дата обращения: 04.01.2019)
- PolSARSignatures* [Электронный ресурс]. URL: <https://github.com/ipms-sb-ras/PolSARSignatures> (дата обращения: 04.01.2019)
- Shang R. et al.* A Fast Algorithm for SAR Image Segmentation Based on Key Pixels // IEEE Journal of Selected Topics in Applied Earth Observations and Remote Sensing. 2017. V. 10. № 12. P. 5657–5673.
- Sun W. et al.* Building Collapse Assessment in Urban Areas Using Texture Information From Postevent SAR Data // IEEE Journal of Selected Topics in Applied Earth Observations and Remote Sensing. 2016. V. 9. № 8. P. 3792–3808.
- Van Zyl J.J., Zebker H.A., Elachi C.* Imaging radar polarization signatures: Theory and observation // Radio Sci. 1987. V. 22. № 4. P. 529–543.

Wang S., Jiao L., Yang S. SAR Images Change Detection Based on Spatial Coding and Nonlocal Similarity Pooling // IEEE Journal of Selected Topics in Applied Earth Observations and Remote Sensing. 2016. V. 9. № 8. P. 3452–3466.

Weissgerber F. et al. A Temporal Estimation of Entropy and Its Comparison With Spatial Estimations on PolSAR Images // IEEE Journal of Selected Topics in Applied Earth Observations and Remote Sensing. 2016. V. 9. № 8. P. 3809–3820.

Spatial Anisotropy Assessment of the Forest Vegetation Heterogeneity at Various Azimuth Angles of the Radar Polarimetric Sensing

V. G. Bondur¹, T. N. Chimitdorzhiev², A. V. Dmitriev², P. N. Dagurov²

¹AEROCOSMOS Research Institute for Aerospace Monitoring, Moscow

²Institute of Physical Materials Science of the Siberian Branch of the Russian Academy of Sciences, Ulan-Ude

The results of studies to assess the texture of L- and C-band radar polarimetric images obtained from SIR-C and ALOS PALSAR-1 satellites for the analysis of forest vegetation characteristics using different signatures are summarized. A fractal polarization signature is proposed for the study, which allows to estimate the spatial anisotropy of forest vegetation inhomogeneities at different azimuthal angles of radar sensing. In addition, the signature of lacunarity is suggested as a tool for qualitative evaluation of the angular distribution of tree branches. The heterogeneities of forest vegetation at the test site near the Baikal Lake have been estimated based on the results of the analysis of fractal dimension and lacunarity at different states of the polarization ellipse.

Keywords: remote sensing of Earth, radar images, radar polarimetry, fractal dimension, lacunarity, forest vegetation.

REFERENCES

Aghababae H., Sahebi M.R. Model-Based Target Scattering Decomposition of Polarimetric SAR Tomography // IEEE Transactions on Geoscience and Remote Sensing. 2018. V. 56. № 2. P. 972–983.

Allain C., Cloitre M. Characterizing the lacunarity of random and deterministic fractal sets // Physical review A. 1991. V. 44. № 6. P. 3552.

Bondur V.G. Aerospace Methods and Technologies for Monitoring Oil and Gas Areas and Facilities // Izvestiya, Atmospheric and Oceanic Physics. 2011. V. 47. № 9. P. 1007–1018. DOI: 10.1134/S0001433811090039

Bondur V.G. Satellite monitoring of trace gas and aerosol emissions during wildfires in Russia // Izvestiya, Atmospheric and Oceanic Physics. 2016. V. 52. № 9. P. 1078–1090. DOI: 10.1134/S0001433816090103

Bondur V.G. Satellite Monitoring of Wildfires during the Anomalous Heat Wave of 2010 in Russia // Izvestiya, Atmospheric and Oceanic Physics. 2011. V. 47. № 9, P. 1039–1048. DOI: 10.1134/S0001433811090040

Bondur V.G., Chimitdorzhiev T.N. Analiz tekstury radiolokatsionnykh izobrazheniy rastitelnosti [Texture analysis of radar images of vegetation] // Izvestiya vysshikh uchebnykh zavedeniy. Geodeziya i aerofotosemka. 2008. № 5. P. 9–14. (In Russian).

Bondur V.G., Chimitdorzhiev T.N. Distantionnoe zondirovanie rastitel'nosti optiko-mikrovolnovymi metodami [Remote sensing of vegetation by optical microwave methods] // Izvestiya vysshikh uchebnykh zavedeniy. Geodeziya i aerofotosemka. 2008. № 6. P. 64–73. (In Russian).

Bondur V.G., Ginzburg A.S. Emission of Carbon-Bearing Gases and Aerosols from Natural Fires on the Territory

of Russia Based on Space Monitoring // Doklady Earth Sciences. 2016. V. 466. № 2. P. 148–152. DOI 10.1134/S1028334X16020045

Bondur V.G., Gordo K.A. satellite monitoring of burnt-out areas and emissions of harmful contaminants due to forest and other wildfires in Russia // Izvestiya, Atmospheric and Oceanic Physics, 2018, V. 54, № 9, P. 955–965. DOI: 10.1134/S0001433818090104

Bondur V.G., Gordo K.A., Klodov V.L. Spacetime distributions of wildfire areas and emissions of carbon-containing gases and aerosols in northern Eurasia according to satellite-monitoring data // Izvestiya, Atmospheric and Oceanic Physics, 2017. V. 53. № 9. P. 859–874. DOI: 10.1134/S0001433817090055

Bondur V.G., Savin A.I. Design of a system to monitor the environment for purposes relating to ecology and natural resources // Soviet Journal of Remote Sensing. 1993. V. 10. № 6. P. 1078–1093.

Bondur V.G., Starchenkov S.A. Metody i programmy obrabotki i klassifikatsii aerokosmicheskikh izobrazheniy [Methods and programs of aerospace imagery processing and classification] // Izvestiya vysshikh uchebnykh zavedeniy. Geodeziya i aerofotosemka. 2001. № 3. P. 118–143.

Bondur V.G., Vorobev V.E. Satellite Monitoring of Impact Arctic Regions // Izvestiya, Atmospheric and Oceanic Physics, 2015, V. 51, № 9, P. 949–968. DOI 10.1134/S0001433815090054

Bondur V.G., Vorobyev V.E., Lukin A.A. Satellite monitoring of the northern territories disturbed by oil production // Izvestiya, Atmospheric and Oceanic Physics. 2017. V. 53. № 9, P. 1005–1013. Doi: 10.1134/S0001433817090067

Chimitdorzhiev T.N. et al. Fraktalny analiz polyarimetricheskikh radiolokatsionnykh dannyh [Fractal Analysis of

- Polarimetric Radar Data] // *Issledovanie Zemli iz Kosmosa*. 2007. № 4. P. 27–33.
- Danudirdjo D., Hirose A.* InSAR Image Regularization and DEM Error Correction With Fractal Surface Scattering Model // *IEEE Transactions on Geoscience and Remote Sensing*. 2015. V. 53. № 3. P. 1427–1439.
- Danudirdjo D., Hirose A.* Local Subpixel Coregistration of Interferometric Synthetic Aperture Radar Images Based on Fractal Models // *IEEE Transactions on Geoscience and Remote Sensing*. 2013. V. 51. № 7. P. 4292–4301.
- Di Martino G. et al.* The Role of Resolution in the Estimation of Fractal Dimension Maps From SAR Data // *Remote Sensing*. 2018. V. 10. № 1. P. 9.
- Dmitriev A.V., Chimitdorzhiev T.N., Dagurov P.N.* New type of polarization signature for radar images of the Earth cover with fractal properties // *Optoelectronics, Instrumentation and Data Processing*. 2016. V. 52. № 3. P. 245–251. DOI: 10.3103/S8756699016030055
- Dmitriev A.V., Chimitdorzhiev T.N., Dagurov P.N.* Fractal polarization signature of radar backscattering variations // 2016 IEEE International Geoscience and Remote Sensing Symposium (IGARSS). 2016. P. 4972–4975. DOI: 10.1109/IGARSS.2016.7730297
- Dmitriev A.V., Chimitdorzhiev T.N., Dagurov P.N.* Polarization Signature of Lacunarity for Heterogeneity Estimation of Radar Backscattering from Pine Forest // IGARSS2018–2018 IEEE International Geoscience and Remote Sensing Symposium. 2018. P. 5326–5329. DOI: 10.1109/IGARSS.2018.8518498
- Dong P.* Test of a new lacunarity estimation method for image texture analysis. // *Int. J. Remote Sens.* 2000. V. 21. № 17. P. 3369–3373.
- Lappalainen H.K., Kerminen V.-M., Petäjä T., ... Bondur V. et al.* Pan-Eurasian Experiment (PEEX): Towards a holistic understanding of the feedbacks and interactions in the land–atmosphere–ocean–society continuum in the Northern Eurasian region // *Atmos. Chem. Phys.*, 2016. V. 16. P. 14421–14461, doi:10.5194/acp-16-14421-2016
- Mandelbrot B.B.* The fractal geometry of nature. New York: W.H. Freeman and Co. 1983. 495 p.
- Myint S.W., Mesev V., Lam N.* Urban textural analysis from remote sensor data: Lacunarity measurements based on the differential box counting method // *Geographical Analysis*. 2006. V. 38. № 4. P. 371–390.
- Orfeo ToolBox (OTB)*. URL: <https://www.orfeo-toolbox.org>
- PolSARSignatures*. URL: <https://github.com/ipms-sb-ras/PolSARSignatures>
- Shang R. et al.* A Fast Algorithm for SAR Image Segmentation Based on Key Pixels // *IEEE Journal of Selected Topics in Applied Earth Observations and Remote Sensing*. 2017. V. 10. № 12. P. 5657–5673.
- Sun W. et al.* Building Collapse Assessment in Urban Areas Using Texture Information From Postevent SAR Data // *IEEE Journal of Selected Topics in Applied Earth Observations and Remote Sensing*. 2016. V. 9. № 8. P. 3792–3808.
- Van Zyl J.J., Zebker H.A., Elachi C.* Imaging radar polarization signatures: Theory and observation // *Radio Sci.* 1987. V. 22. № 4. P. 529–543.
- Wang S., Jiao L., Yang S.* SAR Images Change Detection Based on Spatial Coding and Nonlocal Similarity Pooling // *IEEE Journal of Selected Topics in Applied Earth Observations and Remote Sensing*. 2016. V. 9. № 8. P. 3452–3466.
- Weissgerber F. et al.* A Temporal Estimation of Entropy and Its Comparison With Spatial Estimations on PolSAR Images // *IEEE Journal of Selected Topics in Applied Earth Observations and Remote Sensing*. 2016. V. 9. № 8. P. 3809–3820.