

Общим положительным результатом проведенных исследований является тот факт, что радиолокационное зондирование поверхности земли сейчас считается перспективным способом диагностики окружающей среды. Согласно действующей Федеральной космической программе России на 2006–2015 гг. второй спутник космического комплекса «Метеор-3М» будет запущен в 2013 г. Он должен соответствовать первому по назначению и составу и дополнять его с целью улучшения параметров обзорности и периодичности.

#### Библиографические ссылки

1. Чуркин А. Л. Космический комплекс гидрометеорологического и океанографического обеспечения «Метеор-3М» со спутником «Метеор-М» // Геоматика. 2009. № 3.
2. Системные принципы реализации космического радиолокатора «Северянин-М» / С. Л. Внотченко, А. И. Коваленко, В. В. Риман и др. // Радиолокация и радиосвязь : материалы IV Всерос. науч.-техн. конф. (29.11–03.12.2010, г. Москва) / ИРЭ им. В. А. Котельникова РАН. М., 2010. С. 279–293.
3. Космический радиолокатор «Северянин-М» с широкой полосой съемки / С. Л. Внотченко, М. Ю. Достовалов, В. С. Дудукин и др. // Зондирование земных покровов радарными с синтезированной апертурой : материалы Рос. науч. конф. (06.09–10.09.2010, г. Улан-Удэ) : электрон. сб. докл. / ИРЭ им. В. А. Котельникова РАН. М., 2010. С. 72–84.
4. Wide-Swath Spaceborne SAR System «Severyanin-M» For Remote Sensing: First Results / S. Vnotchenko, M. Dostovalov, V. Dudukin et al. // EUSAR 2012 : 9th

Europ. Conf. on Synthetic Aperture Radar (23–26 April 2012, Nurnberg). P. 422.

5. Сборник алгоритмов БРЛК «Северянин-М». НИИТП. Рег. № НТК-11/978(a) от 08.12.2008.

#### References

1. Churkin A. L. GEOMATIKA 2009. № 3.
2. Vnotchenko S. L., Kovalenko A. I., Riman V. V., Telichev A. V., Chernishov V. S., Shishanov A. V. IV Vserossiyskaya nauchno-tehnicheskaya konferenciya "Radiolokaciya i svyaz" (Proceedings of IV All-Russia scientific and engineering. Conf. Radiolocation and radio), 29.11-3.12.2010, Moscow, Izdanie JRE im. V. A. Kotelnikova RAN, Moscow, 2010, p. 279-293.
3. Vnotchenko S. L., Dostovalov M. J., Dudukin V. S., Kovalenko A. I., Musinyants T. G., Riman V. V., Selyanin A. I., Smirnov A. I., Shishanov A. V. Rossiyskaya nauchnaya konferenciya «Zondirovanie zemnyh pokrovov radarami s sintezirovanoy aperturoy» (The Russian researcher. Conf. "Probing Earth's surface with a synthetic aperture radar"). 06.09-10.09.2010. Ulal-Ude. Elektronnyy sbornik dokladov, Izdanie JRE im. V. A. Kotelnikova RAN, Moscow, 2010. p. 72–84.
4. Vnotchenko S., Dostovalov M., Dudukin V., Kovalenko A., Musinyants T., Riman V., Selyanin A., Smirnov S., Telichev A., Chernishov V., Shishanov A. Wide-Swath Spaceborne SAR System "Severyanin-M" For Remote Sensing: First Results EUSAR 2012 9th European Conference on Synthetic Aperture Radar. Electronic Proceedings, 23-26 April 2012, Nurnberg, Germany, p. 422–kovalenko.pdf
5. Sbornik algoritmov BRLK «Severyanin-M». НИИТП. Рег. № НТК-11/978(a) 08.12.2008.

© Достовалов М. Ю., Коваленко А. И., Костусьяк В. М., Риман В. В., Судоргин С. Г., 2013

УДК 528.85

### ИЗМЕНЕНИЕ ТЕКСТУРНЫХ ПАРАМЕТРОВ ЛЕДЯНОГО ПОКРОВА ЮЖНОЙ ЧАСТИ ОЗЕРА БАЙКАЛ В ПЕРИОД ЛЕДОСТАВА 2010 г. ПО ДАННЫМ ALOS PALSAR\*

Н. В. Родионова<sup>1</sup>, А. В. Филатов<sup>2</sup>, А. В. Евтюшкин<sup>2</sup>

<sup>1</sup>Фрязинский филиал Института радиотехники и электроники имени В. А. Котельникова Российской академии наук  
Россия, 141190, Фрязино Московской области, площадь им. акад. Б. А. Введенского, 1.  
E-mail: rnv@ire.rssi.ru

<sup>2</sup>Балтийский федеральный университет имени И. Канта,  
Россия, 236041, Калининград, ул. А. Невского, 14.  
E-mail: AnFilatov@kantiana.ru, AYevtyushkin@kantiana.ru

Осуществлена текстурная RGB-сегментация с использованием статистик второго порядка Харалика одноканальных изображений ледяного покрова оз. Байкал по радарным данным ALOS PALSAR в сезоне зимавесна. Сделано сравнение с кластеризацией изображений. Подсчитаны текстурные параметры и фрактальный размер в 140 точках вдоль становой трещины Т1 для января и марта, и сделано предположение о возможной связи изменений текстуры с временной и пространственной динамикой деформации льда.

Ключевые слова: одноканальное изображение, ледяной покров, текстурные признаки, статистики второго порядка, сегментация, фрактальный размер, становые трещины.

\* Радарные данные ALOS/PALSAR предоставлены Японским агентством аэрокосмических исследований по гранту 09/JAXA/AEO № 022300.

## LAKE BAIKAL ICE COVER TEXTURE FEATURES CHANGE DURING THE FREEZING PERIOD OF THE YEAR 2010 DUE TO ALOS PALSAR DATA

N. V. Rodionova<sup>1</sup>, A. V. Filatov<sup>2</sup>, A. V. Evtushkin<sup>2</sup>

<sup>1</sup>Institute of Radioengineering and Electronics of Russian Academy of Sciences  
1 Vvedensky square, Fryazino, Moscow region, 141190, Russia. E-mail: rnv@ire.rssi.ru

<sup>2</sup>Baltic Federal University  
14 A. Nevskiy st., Kaliningrad, 236041, Russia. E-mail: AnFilatov@kantiana.ru; AYevtyushkin@kantiana.ru

*The textural segmentation of lake Baikal ice cover have been done by means of GLCM, using ALOS PALSAR one channel images in freezing period of 2010 year. The textural features and surface fractal dimension have been calculated in 140 points along the crack T1 for January and March, and texture change connection with temporal and spatial ice deformation dynamics is hypothesized.*

*Keywords: one channel image, ice cover, texture features, second order statistics, segmentation, fractal dimension.*

Ледяной покров озера Байкал является природным полигоном для изучения закономерностей деформационных процессов в протяженном бассейне с установившейся структурой подледных течений. Дистанционное зондирование ледяного покрова из космоса позволило изучать глобально деформационные процессы на ледяной поверхности за весь период ледостава, который в среднем длится с начала января до первых чисел мая. В данной работе для исследования ледяного покрова оз. Байкал были использованы четыре SLC (single look complex) радиолокационных изображения (РЛИ) южной части озера, полученные японским аппаратом ALOS/PALSAR, L-диапазона, НН поляризации, угол съемки 34°, даты съемки 21.01.10, 07.02.10, 08.03.10, 25.03.10. Исходный размер файлов 9344 × 18432 пикселей, при сжатии в 2 раза по строкам пространственное разрешение равно ~ 7 м.

Исходные изображения являются одноканальными, т. е. получены на одной частоте с одной поляризацией. Информация в одноканальных данных ограничена интенсивностью отраженного сигнала (пиксельная информация) и текстурой (пространственная информация, определяемая в некоторой окрестности пиксела). В работе [1] авторами подсчитана средняя относительная интенсивность радарного отражения от ледяного покрова и средние значения трех статистик второго порядка для рассматриваемых исходных данных, что в результате позволило авторам сделать определенные выводы о динамике деформации льда в период ледостава. Цель данной работы более детально изучить динамику изменения текстуры ледяного покрова южной части оз. Байкал на РЛИ и выявить возможную связь изменений текстуры с временной и пространственной динамикой деформации льда.

В данной работе текстура описывается статистическими методами с помощью текстурных признаков Харалика [2], которые определяются через матрицу смежности. Из множества текстурных признаков (ТП) были выбраны два некоррелирующих признака: контраст (мера распространения уровней яркости) и обратный момент (мера локального сходства). Третьим признаком рассматривалась энтропия – мера беспорядка на изображении. ТП вычислялись на изображениях в движущемся окне [5×5] пикселей при N = 32,

где N – количество строк (и столбцов) матрицы смежности. В результате осуществлена текстурная RGB-сегментация исходных изображений и сделано сравнение с изображениями, полученными применением кластерного анализа. Выявлено изменение ТП и фрактального размера поверхности по 140 точкам вдоль становой трещины Т1, что позволило связать изменения текстуры с изменениями ледяного покрова в окрестности трещины.

**Ледяной покров на озере Байкал в период ледостава.** Замерзает Байкал целиком, кроме небольшого, в 15–20 км протяженностью, участка, находящегося в истоке Ангары. Возникающие при понижении температуры сжимающие усилия во льду, встречая сопротивление изрезанных берегов, к которым «припаян» панцирь по всему контуру озера, рвут лед на поля с размером сторон 10–30 км, при этом между ними образуются термические швы, называемые на Байкале станowymi щелями. Местоположение и направление щелей мало меняется, ширина их постоянно колеблется от 0,5 до 4 м. Ледяные бугры, образующиеся при подвижках льда вдоль станowych трещин, могут достигать 10–12-метровой высоты.

На динамику формирования, деформации и разрушения льда Байкала влияют разные факторы: это и сама форма байкальской впадины с протяженностью, равной 636 км, и шириной 25–79 км, метеоусловия, подледные течения. Способность льда к значительному тепловому расширению приводит к тому, что при средней ширине акватории Байкала порядка 50 км одноактное суточное расширение покрова льда может достигать 45,4 м, а ночью при понижении температуры соответствующее сокращение, это ведет к торошению льда, поддвиганию ледяных пластин (подсовам).

Для э/м волны L-диапазона снег на ледяном покрове можно считать прозрачным в силу того, что электропроводность свежеснежавшего снега при  $t = -6\text{ }^{\circ}\text{C}$  для  $\lambda = 10\text{ см}$  равна  $0,6 \times 10^{-4}\text{ См (сименс)/м}$ , а плотного снега в 3,5 раза больше, и глубина проникновения э/м волны составляет, соответственно, 100 м и 30 м. Глубина проникновения э/м волны в пресноводный лед при  $t = -10\text{ }^{\circ}\text{C}$  составляет 9 м для  $\lambda = 0,3\text{ м}$ .

**Текстурная RGB-сегментация ледяного покрова.** Сегментация – это разбиение изображения на области, удовлетворяющие некоторым критериям однород-

ности, в качестве которых могут быть яркость, текстура, цвет и другие. Сегментация является инструментом для распознавания, понимания изображений. В постановке задачи сегментации прослеживается аналогия с задачей кластеризации.

В данной работе вычисление статистик второго порядка осуществлялось на отфильтрованных с помощью фильтра Lee [3] изображениях в движущемся окне  $[5 \times 5]$  пикселей с  $N = 32$ . Фильтрация необходима из-за сильного влияния спеклов на текстуру [4]. Зная физический смысл текстурных признаков, можно интерпретировать полученные текстурные RGB-изображения (контраст – red, энтропия – green, обратный момент – blue) в терминах параметров поверхности, а, именно, области с синим цветом соответствуют большим значениям обратного момента – это относительно гладкие поверхности, области с зеленым цветом соответствуют большим значениям энтропии – это области с повышенным хаосом, беспорядком, области с красным цветом характеризуются большими перепадами яркости в соседних точках.

Сравнение с кластеризацией, осуществленной с помощью пакета Iwls, показывает преимущество текстурной RGB сегментация из-за возможности получить информацию об объектах на изображении без априорного знания.

Изменения текстурных параметров вдоль становой трещины T1 в период ледостава.

На исходных РЛИ есть общий фрагмент со становой трещиной T1, идущей от пос. Большие коты почти в меридиональном направлении на пос. Танхой [5] (рис. 1). В данной работе были подсчитаны значения ТП в окне  $[43 \times 43]$  пикселя вдоль становой трещины T1 в направлении с севера на юг, что позволило определить пространственные изменения ТП вдоль трещины, а также временные изменения за время ледостава (ТП вычислены для двух сеансов: 21.01 и 25.03).

Причины формирования станových трещин в одних и тех же местах связываются с разными факторами, зачастую противоречивыми. В Лиственничном заливе существует антициклоническая циркуляционная ячейка [6], причиной генерации которой является сток в Ангару. Положение этой зоны совпадает со становой трещиной T1 [5].

На рис. 2 приведены графики изменения значений ТП вдоль становой трещины T1 в направлении с севера на юг для двух сеансов (21.01 и 25.03). Конечная точка (140-ая) немного не доходит до берега (она обозначена белым кружком на рис. 1).

Проанализируем графики на рис. 2.

1. Средние значения ТП ‘контраст’ вблизи берега меньше, чем в средней части акватории, а значения в марте почти в 2 раза превышают значения в январе. Значительное увеличение контраста в марте возможно связано с ростом высоты бугров вдоль трещины из-за роста деформационных процессов при резких температурных перепадах, составляющих порядка  $14^\circ$  в марте (по температурным данным в пос. Танхой).

2. Для январского сеанса средние значения ТП «обратный момент» вблизи берега выше (меньшая шероховатость), чем в средней части, со значительными перепадами значений вдоль всей становой трещины. Значения обратного момента в марте, в отличие от января, меняются плавно со значительно меньшими перепадами. В марте значения вблизи берега почти в 1,5 раза меньше, чем в январе, что свидетельствует о том, что вблизи берега в марте поверхность вдоль трещины более шероховатая, чем в январе. Вдали от берега для некоторых зон значения обратного момента близки для обеих дат.

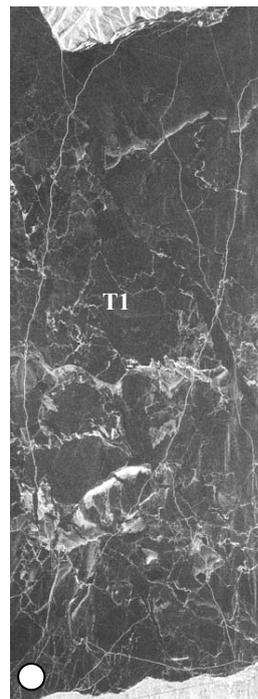


Рис.1. Фрагмент исходного РЛИ со становой трещиной T1. Дата съемки 25.03.2010 г., размер изображения 2 216 × 6 016 пикселей

3. Средние значения энтропии в январе вблизи берегов меньше, чем в средней части, со значительными перепадами значений вдоль трещины. Для марта ход изменений энтропии плавный с небольшими перепадами. Значения ‘энтропии’ в марте выше, чем в январе, как вблизи, так и вдали от берега, что свидетельствует о большем хаосе вдоль всей становой трещины в марте.

Для измерения силы линейной корреляционной связи ТП для двух дат воспользуемся коэффициентом корреляции Пирсона (ККП). Для ТП ‘контраст’ ККП равен 0,59 с вероятностью ошибки, соответствующей предположению о ненулевой корреляции, равной  $1,93E-14$ , что свидетельствует о значительной корреляции значений контраста вдоль становой трещины T1 для января и марта. ККП для двумерной выборки значений ТП «обратный момент» равен 0,62 с вероятностью ошибки, равной  $2,22E-16$  и 2-мерной выборки значений ТП «энтропия» равен 0,657 с вероятностью ошибки, равной нулю.

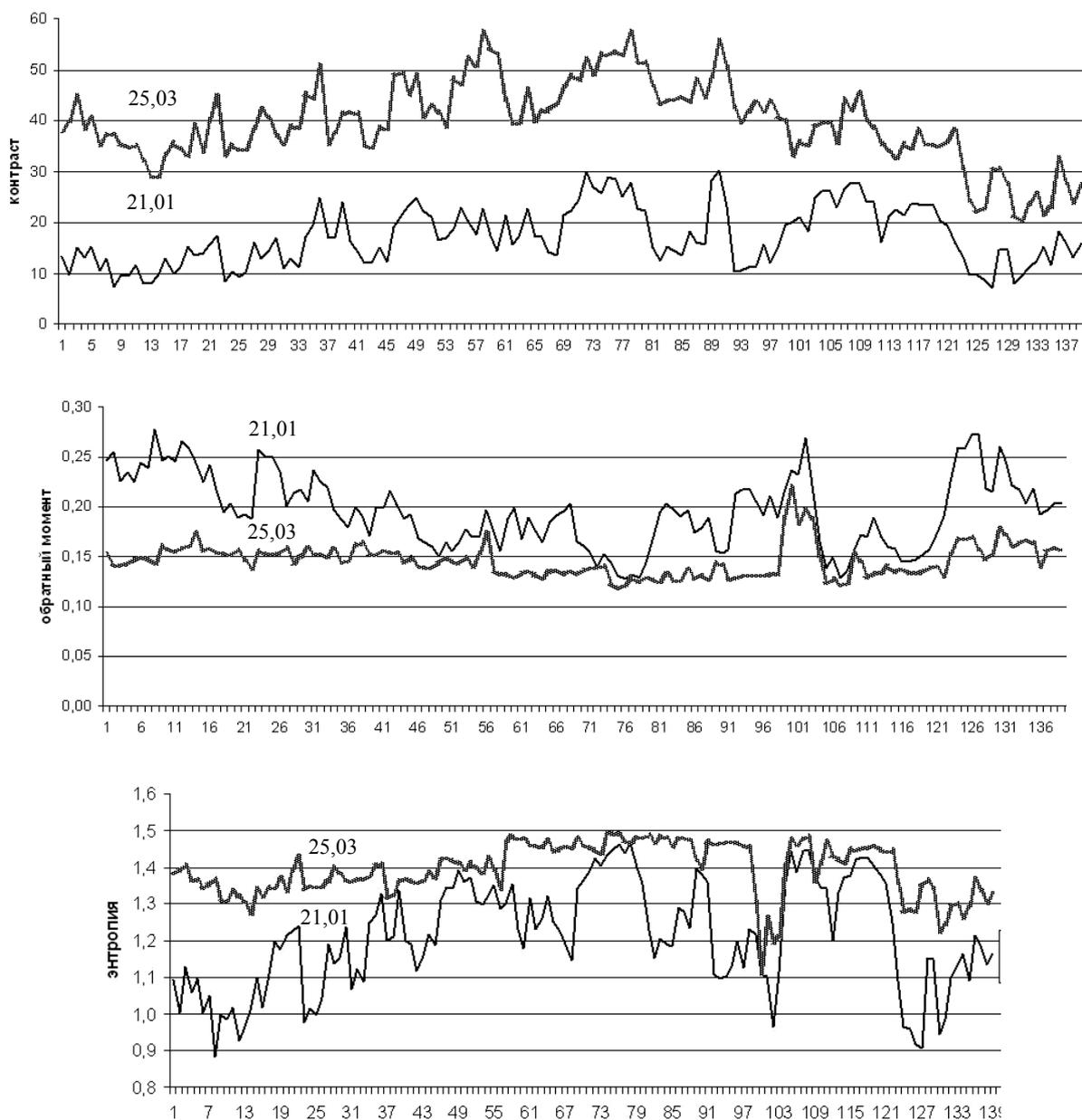


Рис. 2. Изменение значений текстурных параметров вдоль становой трещины Т1 в направлении с севера на юг для сеансов: 21.01 и 25.03

**Изменения фрактального размера поверхности вдоль становой трещины Т1 в период ледостава.** Фрактальный размер (ФР) обычно связывают с шероховатостью поверхности. В данной работе вычисление ФР осуществлялось с помощью пакета обработки изображений Fiji. Результат вычисления ФР поверхности в окне  $43 \times 43$  пиксела вдоль становой трещины Т1 для двух сеансов 21.01 и 25.03 показан на рис. 3. В январе ФР испытывает значительные колебания значений вдоль трещины, причем средние значения вблизи берега меньше, чем вдали от берега. Для мартовского сеанса характерны стабильные на всем протяжении становой трещины высокие значения ФР, значительно превышающие соответствующие значения для января у берега. Это можно интерпретировать как стабильно высокую шероховатость вдоль всей

становой трещины в сеансе 25 марта, что подтверждает результаты, полученные при вычислении статистик второго порядка Харалика.

ККП для выборки значений ФР равен 0,434 с вероятностью ошибки, равной  $8,34E-08$ .

Текстурная RGB сегментация на базе статистик второго порядка Харалика позволила получить предварительную информацию об объектах на изображении без априорного знания, что является преимуществом перед кластеризацией и является шагом к классификации изображения. Значения коэффициента корреляции Пирсона для ТП вдоль становой трещины Т1 показали сильную взаимосвязь данных в январе и марте. В январе характерно увеличение шероховатости вдоль трещины по мере удаления от берега с большими перепадами значений. В марте изменения

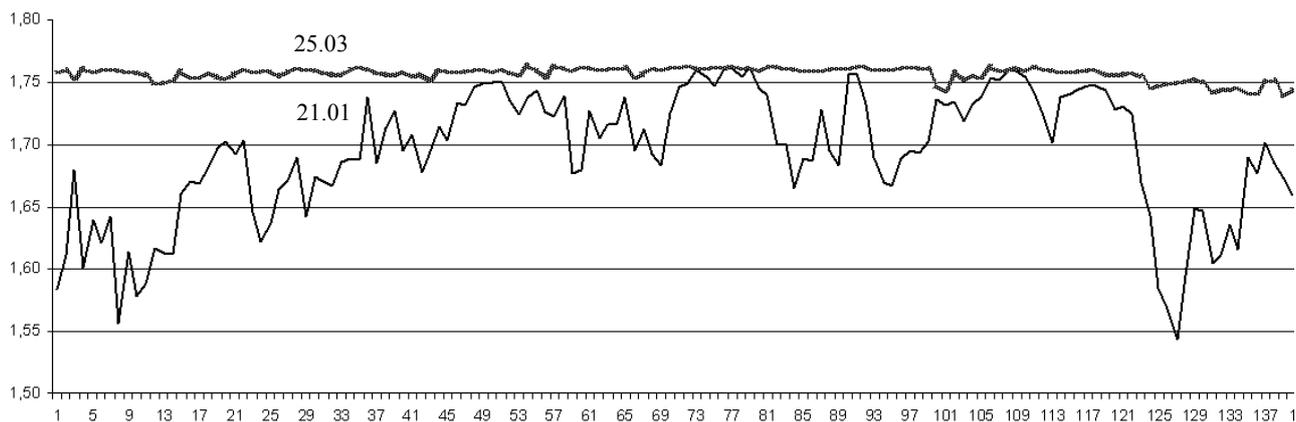


Рис. 3. Изменение значений фрактального размера поверхности вдоль становой трещины T1 в направлении с севера на юг для двух сеансов: 21.01 и 25.03

значений ТП вдоль трещины плавные (кроме контраста) и их можно интерпретировать как стабильно большой беспорядок и повышенную шероховатость поверхности в сравнении с январскими данными. Значительное увеличение 'контраста' для марта связано, возможно, с ростом высоты бугров вдоль становой трещины. Изменения значений фрактального размера вдоль становой трещины подтверждают данные, полученные для ТП.

#### Библиографические ссылки

1. Текстуальный анализ радарных изображений ледового покрова озера Байкал на основе данных ALOS PALSAR / И. И. Кирбижекова, Т. Н. Чимитдоржиев, А. С. Леонов и др. // II Всерос. Армандовские чтения. Радиофизические методы в дистанционном зондировании сред : материалы V Всерос. науч. конфер. Муром : ИПЦ МИ ВлГУ, 2012. С. 203–208.
2. Haralick R. M., Shanmugam K., Dinstein I. Textural Features for Image Classification // IEEE. Trans. Syst. Man and Cybernetics. 1973. № 3 (6). P. 610–621.
3. Lee J.-S. A Simple Speckle Smoothing Algorithm for Synthetic Aperture Radar Images // IEEE Trans. SMC. 1983. № 13 (1). P. 85–89.
4. Родионова Н. В. Влияние фильтрации спеклшума на статистические характеристики поляриметрических РЛИ // Исследования Земли из космоса. 2005. № 5. С. 34–43.

5. Деформации и сейсмические явления в ледяном покрове озера Байкал / В. В. Ружич, С. Г. Псахье, Е. Н. Черных и др. // Геология и геофизика. 2009. Т. 50, № 3. С. 289–299.

6. Бордонский Г. С. Причины возникновения становых трещин в ледяных покровах озер // География и природные ресурсы. 2007. № 2. С. 69–75.

#### References

1. Kirbizhekova I. I., Chimitdorzhiev T. N., Leonov A. S., Tubanov T. A., Tatkov G. I. II Vserossijskie Armandovskie chtenija. Radiofizicheskie metodi v distantsionnom zondirovanii sred. Materiali V Vserossijskoi nauchnoj konferentsii. Murom, 2012. 567 p. ISSN 2304-0297 (CD-ROM). pp. 203–208.
2. Haralick, R. M., Shanmugam K., Dinstein I. Textural Features for Image Classification (1973) IEEE Trans. Syst. Man and Cybernetics, 3 (6), pp. 610–621.
3. Lee, J.-S. A Simple Speckle Smoothing Algorithm for Synthetic Aperture Radar Images (1983) IEEE Trans. SMC, 13 (1), pp. 85–89.
4. Rodionova N. V. Issledovanie Zemli iz kosmosa, 2005, no. 5, pp. 34–43.
5. Ruzhich V. V., Psah'e S. G., Chernih E. N., Bornjakov S. A., Granin N. G. Geologija i geofizika, 2009, 50(3), pp. 289–299.
6. Bordonskij G. S. Geografija i prirodni resursi, 2007, no. 2, pp. 69–75.

© Родионова Н. В., Филатов А. В., Евтюшкин А. В., 2013