

Изменение текстурных параметров ледяного покрова южной части озера Байкал в период ледостава 2010 года по радарным данным ALOS PALSAR

Н.В. Родионова¹, А.В. Филатов², А.В. Евтушкун²

¹ Фрязинский филиал Института радиотехники и электроники РАН,
Фрязино Московской обл., Россия

E-mail: rnv@ire.rssi.ru

² Балтийский федеральный университет им. И. Канта, Калининград, Россия
E-mail: AnFilatov@kantiana.ru,
AYevtyushkin@kantiana.ru

В работе осуществлена текстурная RGB сегментация с использованием статистик второго порядка Харалика одноканальных изображений ледяного покрова озера Байкал по радарным данным ALOS PALSAR в сезоне зима–весна. Сделано сравнение с кластеризацией изображений. Подсчитаны текстурные параметры и фрактальный размер в 140 точках вдоль становой трещины T1 для января и марта, и сделано предположение о возможной связи изменений текстуры с временной и пространственной динамикой деформации льда.

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

Введение

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 пикселов, 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 пикселя). В работе (Кирбижекова и др., 2012) авторами подсчитана средняя относительная интенсивность радарного отражения от ледяного покрова озера Байкал 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 озера 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 (Haralick et al., 1973), которые определяются через матрицу совместного появления уровней яркости пар смежных точек внутри скользящего окна (или 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. Текстурные признаки вычислялись на изображениях в движущемся окне [5*5] пикселов при $N = 32$, где N – количество строк (и столбцов) матрицы смежности. В результате осуществлена текстурная RGB сегментация исходных одноканальных изображений и сделано сравнение с изображениями, полученными применением кластерного анализа. Выявлено изменение ТП и фрактального размера поверхности по 140 точкам вдоль станововой 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 становыми щелями. Местоположение и направление щелей мало меняется, ширина их постоянно колеблется от 0,5 до 4 м. Ледяные бугры, образующиеся при подвижках льда вдоль становых 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 (температура, господствующие ветра, западные циклоны, сибирские антициклоны); 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, глубина проникновения э/м волны в пресноводный лед при $t = -10^{\circ}\text{C}$ составляет 9 м для $\lambda = 0,3$ м, а в снег – почти на порядок больше.

Текстурная RGB сегментация ледяного покрова

Сегментация – это разбиение изображения на области, удовлетворяющие некоторым критериям однородности, в качестве которых могут быть яркость, текстура, цвет и др. Сегментация является инструментом для распознавания, понимания изображений. В постановке задачи сегментации прослеживается аналогия с задачей кластеризации (или классификации без обучения).

В данной работе вычисление статистик второго порядка осуществлялось на отфильтрованных с помощью фильтра Lee (Lee, 1983) изображениях в движущемся окне $[5 \times 5]$ пикселов с $N = 32$. Фильтрация необходима из-за сильного влияния спектров на текстуру (Родионова, 2005). Зная физический смысл текстурных признаков, можно интерпретировать полученные текстурные RGB изображения (*рис. 1*) (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.

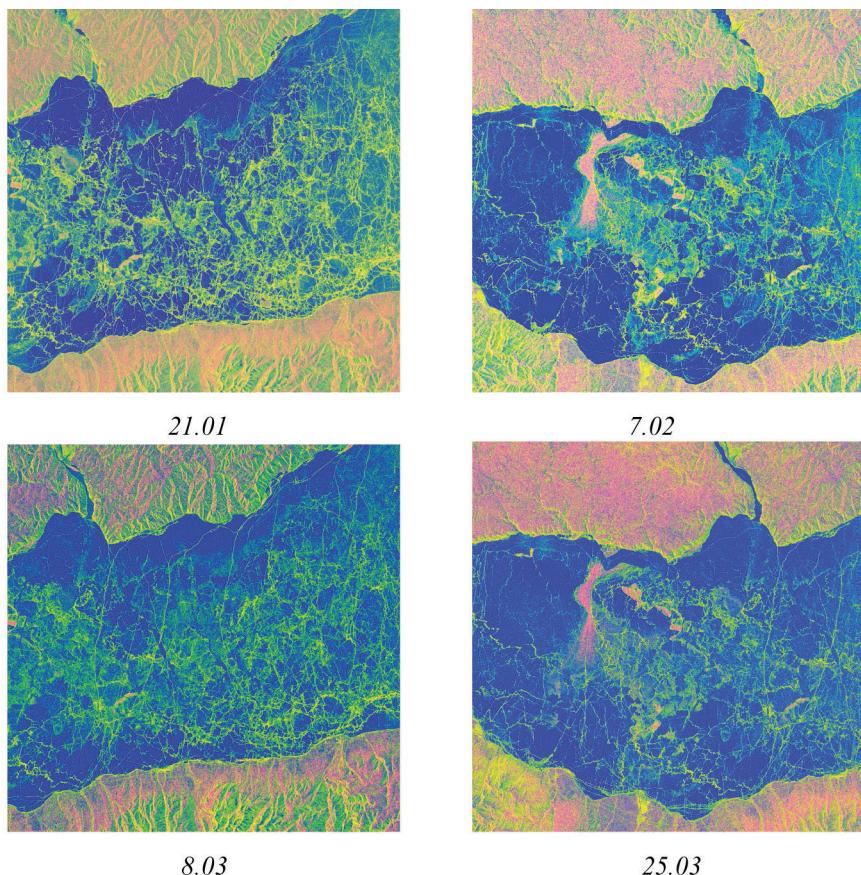


Рис. 1. Текстурная RGB сегментация фильтрованных изображений

Сравнение изображений за 21 января и 8 марта показывает значительный беспорядок на ледяном покрове в январе в сравнении с началом марта. Сравнение текстурных изображений за 7 февраля и 25 марта показывает больший хаос в центральной части

изображения и меньшее число трещин в прибрежной области в феврале по сравнению с концом марта.

Для того чтобы свести задачу сегментации к задаче кластеризации, достаточно задать отображение точек изображения в некоторое пространство признаков и ввести метрику (меру близости) на этом пространстве признаков. Полученная выше текстурная RGB сегментация (*рис. 1*) имеет неизвестное число классов однородности по ТП. При кластеризации изображения, количество классов (кластеров) в зависимости от выбранного алгоритма или задается заранее, или определяется результатом кластеризации. В данной работе кластеризация осуществлена с помощью свободно распространяемого пакета *Ilwis* (<http://www.52north.org/>). Заложенный в *Ilwis* алгоритм требует на входе задания числа кластеров. Учитывая, что алгоритмы кластеризации плохо работают на зашумленных изображениях, кластеризация была осуществлена на предварительно отфильтрованных от спеклов изображениях. Результат кластеризации для числа кластеров, равного 6, показан на *рис. 2*.

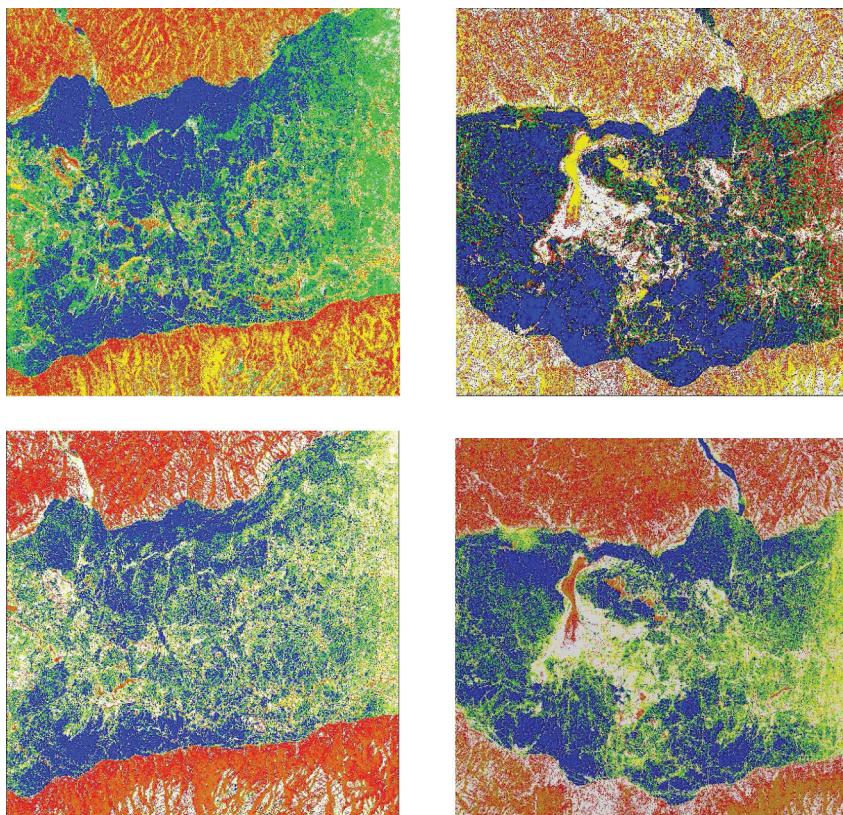


Рис. 2. Кластеризация исходных РЛИ с числом кластеров, равным 6, соответственно, для 21 января, 7 февраля, 8 и 25 марта

Кластеризация не позволяет интерпретировать полученное изображение без априорной информации в то время, как текстурная RGB сегментация на базе статистик второго порядка Харалика дает возможность получить информацию об объектах на изображении без априорного знания, и это является преимуществом перед кластеризацией и является шагом к классификации изображения.

Изменения текстурных параметров вдоль становой трещины Т1 в период ледостава

На имеющихся четырех РЛИ есть общий фрагмент, включающий становую трещину Т1, идущую от поселка Большие Коты почти в меридиональном направлении на поселок Танхой (Ружич и др., 2009) (*рис. 3*, дата съемки 25.03.2010, размер изображения 2216*6016 пикселов). В данной работе были подсчитаны значения ТП в окне [43×43] пикселя вдоль становой трещины Т1 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 января и 25 марта).

Причина формирования становых трещин в одних и тех же местах связывается с разными факторами, зачастую противоречивыми – это донное газоотделение, перепады температуры воздуха, атмосферного давления, влияние ветра, землетрясений, подледных течений и т.д. Автором работы (Бордонский, 2007) на базе полученных результатов при СВЧ- радиометрии льда, сделано предположение, что образование становых трещин связано с ослаблением льда на определенных участках из-за направленного роста кристаллов под влиянием подледных течений, возникающих под воздействием сейшевых колебаний. Зимой подводные течения определяются собственными колебаниями – сейшами, которые генерируются внешними воздействиями: перепадами атмосферного давления (Жданов и др., 2002), сейсмическими процессами, колебаниями уровня вод (Сокольников, 1960). На озере Байкал циркуляции располагаются в определенных местах, размер сейшевых циркуляций соответствует расстоянию между становыми трещинами, пересекающими озеро на дистанции 10–50 км (Сокольников, 1960).

Известно, что после ледостава во всей водной толще сохраняются подледные течения с уменьшенной скоростью (из-за экранирования ветра льдом) с сохранением структуры течений (Жданов и др., 2002). В Лиственничном заливе существует антициклоническая циркуляционная ячейка (Бордонский, 2007, *рис. 4*), причиной генерации которой является сток в Ангару. Положение этой зоны совпадает со становой трещиной, идущей от поселка Большие Коты почти в меридиональном направлении на поселок Танхой (Ружич и др., 2009).

Система подледных течений, возможно, оказывает влияние на формирование становых трещин, но главными концентраторами напряжений являются мысы, и почти все поперечные к берегу становые трещины начинаются от мысов (Ружич и др., 2009).

На *рис. 4* приведены графики изменения ТП вдоль становой трещины Т1 в направлении с севера на юг для двух сеансов: 21 января и 25 марта. Конечная точка (140-ая) немного не доходит до берега (она обозначена белым кружком на *рис. 3*).

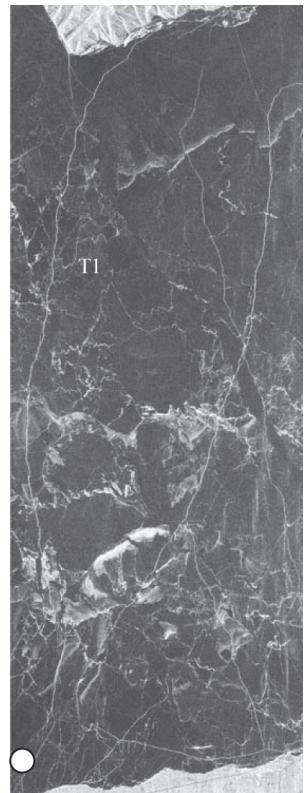


Рис. 3

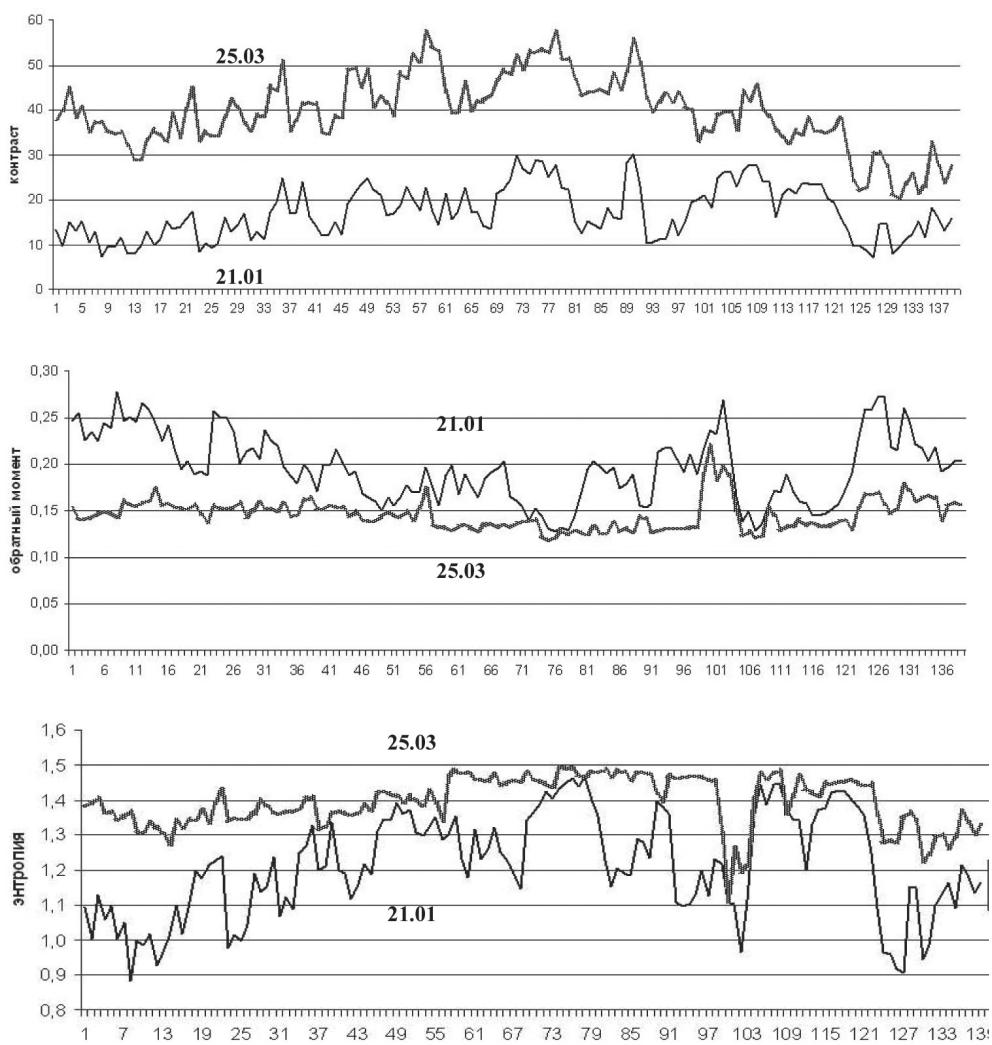


Рис. 4. Изменение значений текстурных параметров (контраста, обратного момента и энтропии) вдоль становой трещины Т1 в направлении с севера на юг для двух сеансов: 21.01.2010 и 25.03.2010

Проанализируем графики на рис. 4.

1. Средние значения ТП контраст вблизи берега меньше, чем в средней части окрестности становой трещины, причем значения в марте почти в 2 раза превышают значения в январе. Значительное увеличение контраста в марте, возможно, связано с ростом высоты бугров вдоль трещины, связанным с ростом деформационных процессов из-за резких температурных перепадов порядка 14° (по температурным данным в поселке Танхой). Следует ожидать именно в марте наибольших изменений физических свойств льда и параметров напряженного состояния.

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. В отличие от января в марте значения обратного момента плавно меняются со значительно меньшими перепадами, причем 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.

3. Средние значения ТП энтропия в январе вблизи берегов меньше, чем в средней части, со значительными перепадами значений вдоль трещины. Для марта ход изменений энтропии плавный с небольшими перепадами значений, причем как вблизи, так и вдали от берега значения энтропии в марте выше, чем в январе, 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) r с помощью программы анализа данных статистическими методами AtteStat. Коэффициент корреляции меняется в диапазоне от -1 до 1 . При независимом изменении переменных, когда связь между ними отсутствует, $r = 0$. Чем сильнее связь, тем больше r . Значения $r > 0$ указывают на прямую связь между переменными, а значения $r < 0$ – на обратную связь. 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 для двумерной выборки значений ТП энтропия ККП равен $0,657$ с вероятностью ошибки, равной нулю.

Изменения фрактального размера вдоль становой трещины T1 в период ледостава

Помимо статистического анализа, фрактальная геометрия также является очень полезным инструментом для текстурного анализа РСА изображений. Фрактальный размер обычно связывают с шероховатостью поверхности.

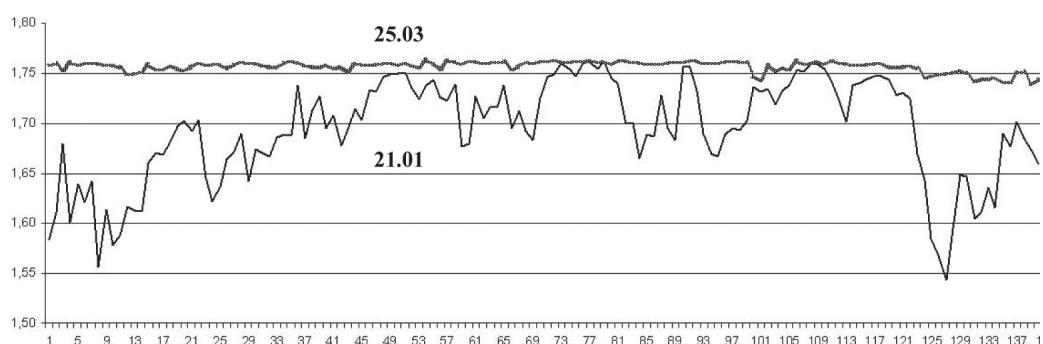


Рис. 5. Изменение значений фрактального размера поверхности вдоль становой трещины T1 в направлении с севера на юг для двух сеансов: 21.01.2010 и 25.03.2010

В данной работе вычисление фрактального размера осуществлялось с помощью свободно распространяемого пакета обработки изображений Fiji (<http://fiji.sc/wiki/index.php/Fiji>). Полное описание метода можно найти в (Smith et al., 1996). Результат вычисления фрактального размера поверхности в окне $43*43$ пикселя вдоль становой трещины T1 для двух сеансов 21 января и 25 марта показан на рис. 5. Отмечаем прежде всего сильное отличие графиков для рассматриваемых сеансов. Для января фрактальный размер испытывает значительные

колебания вдоль трещины, с меньшими значениями вблизи берега, что можно интерпретировать как скачки значений шероховатости вдоль трещины с меньшими значениями у берега. Для 25 марта характерно стабильное на всем протяжении становой трещины высокое значение фрактального размера, значительно превышающее это значение для января у берега, что можно интерпретировать как стабильно высокую шероховатость вдоль всей становой трещины 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.

Заключение

Текстурная RGB сегментация на базе статистик второго порядка Харалика позволяет получить предварительную информацию об объектах на изображении без априорного знания, что является преимуществом перед кластеризацией и является шагом к классификации изображения. Вычисление коэффициента корреляции Пирсона для значений ТП вдоль становой трещины Т1 показало сильную взаимосвязь значений в январе и марте. Для января характерно увеличение шероховатости вдоль трещины по мере удаления от берега с большими перепадами значений. В марте характер изменения ТП вдоль трещины меняется (кроме контраста), а именно, ТП обратный момент и энтропия имеют плавный характер изменений со значительно меньшими перепадами значений, т.е. значения стабилизируются и показывают больший хаос и большую шероховатость вдоль всей трещины. Значительное увеличение контраста для марта вдоль всей трещины связано, возможно, с ростом высоты бугров. Изменения значений фрактального размера вдоль становой трещины подтверждают данные, полученные для ТП.

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

Литература

1. *Бордонский Г.С.* Причины возникновения становых трещин в ледяных покровах озер // География и природные ресурсы. 2007. № 2. С. 69–75.
2. *Жданов А.А., Гранин Н.Г., Шимараев М.Н.* Подледные течения Байкала (на основе новых экспериментальных данных) // География и природные ресурсы. 2002. № 1. С. 79–83.
3. *Кирбиженкова И.И., Чимитдоржиев Т.Н., Леонов А.С., Тубанов Ц.А., Татьков Г.И.* Текстурный анализ радарных изображений ледового покрова озера Байкал на основе данных ALOS PALSAR // II Всеросс. Армандовские чтения [Электронный ресурс]; Радиофизические методы в дистанционном зондировании сред / Материалы V Всеросс. науч. конфер. Муром: Изд.-полигр. центр МИ ВлГУ, 2012. 567 с. ISSN 2304-0297 (CD-ROM). С. 203–208.
4. *Родионова Н.В.* Влияние фильтрации спекл-шума на статистические характеристики поляриметрических РЛИ // Исследования Земли из космоса. 2005. № 5. С. 34–43.

5. Ружич В.В., Псахье С.Г., Черных Е.Н., Борняков С.А., Гранин Н.Г. Деформации и сейсмические явления в ледяном покрове озера Байкал // Геология и геофизика. 2009. Т. 50. № 3. С. 289–299.
6. Сокольников В.М. Вертикальные и горизонтальные смещения и деформации сплошного ледяного покрова Байкала // Исследования гидрологического режима Байкала: Труды Байкальской лимнологической станции. М.; Л.: Изд-во АН СССР, 1960. Т. 18.
7. Haralick R.M., Shanmugam K., Dinstein I. Textural Features for Image Classification // IEEE. Trans. Syst. Man and Cybernetics. 1973. Vol. 3. No. 6. P. 610–621.
8. Lee J.-S. A Simple Speckle Smoothing Algorithm for Synthetic Aperture Radar Images // IEEE Trans. SMC. 1983. Vol. 13. No. 1. P. 85–89.
9. Smith T.G., Lange G.D., Marks W.B. Fractal methods and results in cellular morphology – dimensions, lacunarity and multifractals // J. Neurosci. Methods. 1996. Vol. 69. No. 2. P. 123–136.

Lake Baikal ice cover texture features change during the freezing period 2010 by ALOS PALSAR data

N.V. Rodionova¹, A.V. Filatov², A.V. Evtyushkin²

¹ Institute of Radioengineering and Electronics RAS, Fryazino, Russia

E-mail: rnv@ire.rssi.ru

² Baltic Federal University, Kaliningrad, Russia

E-mail: AnFilatov@kantiana.ru,

AEvtyushkin@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 2010 year. The textural features and surface fractal dimension have been calculated in 140 points along stanovaya crack for January and March, and texture change connection with temporal and spatial ice deformation dynamics suggested.

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