

Текстурный анализ радарных изображений ледового покрова озера Байкал на основе данных ALOS PALSAR

И.И.Кирбижекова¹, Т.Н.Чимитдоржиев¹, Леонов А.С.¹, Ц.А.Тубанов², Г.И.Татьков²

¹Институт физического материаловедения СО РАН,

²Геологический институт СО РАН, Улан-Удэ, ул.Сахьяновой,8, kirbizhekova@bk.ru

В рамках исследований закономерностей «сейсмической активности» ледового покрова и её связи с деформациями на межплитных границах отработана методика текстурного анализа радарных изображений L-диапазона ALOS PALSAR южной части оз. Байкал в период ледостава с января по апрель 2010 г.

In studies of regularities "seismic activity" of ice cover and its relation with deformations at the interplate border the technique of the textural analysis of radar images L-band ALOS PALSAR of the lake Baikal southern part during the freezing-over from January to April 2008-2011 is fulfilled.

Введение. Изучение закономерностей физико-механических процессов в литосфере, в том числе связанных с локализацией деформаций на активных границах раздела блоков и плит является важным направлением в современной геотектонике. Как показали результаты выполнения междисциплинарных интеграционных проектов СО РАН, перспективной моделью для исследования закономерностей деформационных и сейсмических процессов является ледовый покров озера Байкал [1-4]. Наземные GPS наблюдения образуют редкую сеть дискретную в пространстве и во времени, на основе которой сложно судить о характере деформаций ледового покрова. Переход к непрерывным, пространственным наблюдениям деформаций ледового покрова возможен с использованием спутниковой информации.

Попытки использования для изучения блоковой структуры ледового покрова оз. Байкал спутниковых изображений в оптическом диапазоне оказались неудачными. Так снимки со спутников QuickBird в 2006 и с французского спутника SPOT в 2008 на оказались малопригодными для исследования ледового покрова в одних случаях вследствие облачности, а на «безоблачных» снимках из-за наличия дымки над озером или засветки в областях интенсивного развития снежных наносов. В 2008-2009 гг. был получен положительный опыт использования спутниковых данных MODIS для дешифрирования и изучения кольцевых структур на льду оз.Байкал (сайт www.geol.irk.ru).

В 2008 г. впервые были обработаны два радарных снимка 17 марта и 10 апреля 2008 года, полученных с канадского спутника Radarsat-1 в сантиметровом диапазоне (5.3GHz), но определить вертикальные и горизонтальные смещения ледяных плит не удалось из-за чрезвычайно низкой когерентности, не позволившей построить интерферограмму. Сравнение снимков Radarsat и SPOT (17-19 марта 2008 г.) показало, что на радарном снимке практически сняты снежные поля и наносы, и радарное изображение хорошо отображает структуру блоков ледового покрова, в то же время плотно слежавшийся снег или наст хорошо различимый на оптическом снимке проявился и на радарном снимке – по интенсивности сигнала эти участки оказались неотличимы от зон раскристаллизованного льда, что усложняет интерпретацию радарных снимков.

В 2009-2011 гг. для мониторинга подстилающей поверхности ледового покрова южной части оз. Байкал были привлечены данные японского радара ALOS PALSAR в дециметровом диапазоне с длиной волны 23 см [5]. Более длинноволновой диапазон и режим съёмки PALSAR PLR (HH или VV) с высокой разрешающей способностью

порядка 7 м позволяет повысить уровень когерентности отражённых сигналов, даже, несмотря на значительный временной интервал между двумя последовательными съёмками 46 дней.

В данной работе представлены результаты текстурного анализа радарных изображений ледового покрова, который проводился наряду с интерферометрической обработкой и дополнил общую картину формирования и динамики блочно-плитной структуры ледового покрова южной части озера Байкал.

Определение текстурных характеристик ледового покрова 2010 года южной части оз. Байкал по радарным изображениям ALOS PALSAR

Для отработки методики текстурного анализа для исследования процессов формирования и развития блочно-плитной структуры ледового покрова были выбраны радарные данные 2010 года (21 января, 7 февраля, 8 и 25 марта) вблизи посёлка Листвянка в южной части озера Байкал.

За всё время наблюдений за гидрометеорологическими условиями и ледовым покровом (с 1868 года) средняя дата замерзания озера в районе п. Листвянка – 12 января, вскрытия – 1 мая, средние сроки ледостава 112 дней. За последние 30 лет средние сроки ледостава уменьшились до 102 дней. По данным метеостанции Davis Weatherlink 5.8.0 и наблюдений группы Н.Г. Гранина (ЛИН СО РАН) зима 2010 года была самой суровой за последние 5 лет: ледостав продолжался 127 дней, а толщина льда достигла 1,09 м. В период с 1949 года бóльшая толщина льда наблюдалась в Листвянке только дважды: 1,17 м – в 1968 году и 1,13 м в 1957 году. Средняя температура воздуха и амплитуда суточных колебаний температуры за январь-апрель составили $-12,1^{\circ}\text{C}$ и $41,8^{\circ}\text{C}$, минимум температура воздуха $-30,7^{\circ}\text{C}$ зафиксирован 2 февраля.

При обработке радарных изображений использовались две группы текстурных фильтров: вероятностного и структурного типа [6-9]. Первая группа основана на расчёте количества уровней серого цвета и последующем определении статистических показателей пространственного распределения. Вторая группа текстурных фильтров базируется на определении матрицы смежности (матрицы совместной встречаемости) уровней яркости в скользящем окне и окне, смещённом относительно первого. На основе матрицы смежности можно построить до 20 показателей.

На рис.1 представлено изображение южной части озера Байкал, где хорошо видна сформировавшаяся к началу марта система ледовых плит, их границ, зон подвижек и разрыва. Относительная интенсивность радарного отражения от ледового покрова Байкала и Ангары составляет в среднем 25 % от максимального уровня, характерного для зон деструкции, горных областей на материке. Для трещин интенсивность выше, порядка 40-80%. Ввиду установившихся низких температур для этого года характерно слабое «обновление» трещин, так что относительные изменения интенсивности отражённого радарного сигнала невелики от одной даты к другой, что, по-видимому, связано с процессом нарастания льда: наблюдениями зарегистрировано увеличение толщины ледового покрова с 50 см в начале февраля до 1 м в начале марта. По характеру и порядку изменений интенсивности в феврале- марте точки наблюдения вдоль становой трещины Т1 следует разбить на три группы: а) пониженной интенсивности - точки наблюдения в прибрежной части; б) средней – точки в центральной части; в) высокоинтенсивные - точки, расположенные на окончании становой трещины, где концентрируются максимальные напряжения и отмечается постоянный рост трещинообразования. Сравнение нормированных интенсивностей отражений показывает, что для ледового покрова к началу марта происходит рост исследуемого показателя в среднем на 40-50% , а к концу марта происходит

уменьшение – «залечивание» трещин в прибрежной части. Интенсивность отражений в средней части трещины практически сохраняется на протяжении конца февраля - марта. Для конечных точек фиксируется постоянный рост деформаций, отмечаемых повышениями интенсивности радарных отражений. По данным наземных наблюдений за сейсмическим шумом в период 10-11 марта отмечается глобальное изменение напряженного состояния изучаемого фрагмента ледовой плиты ограниченного становыми трещинами T1 и T2.

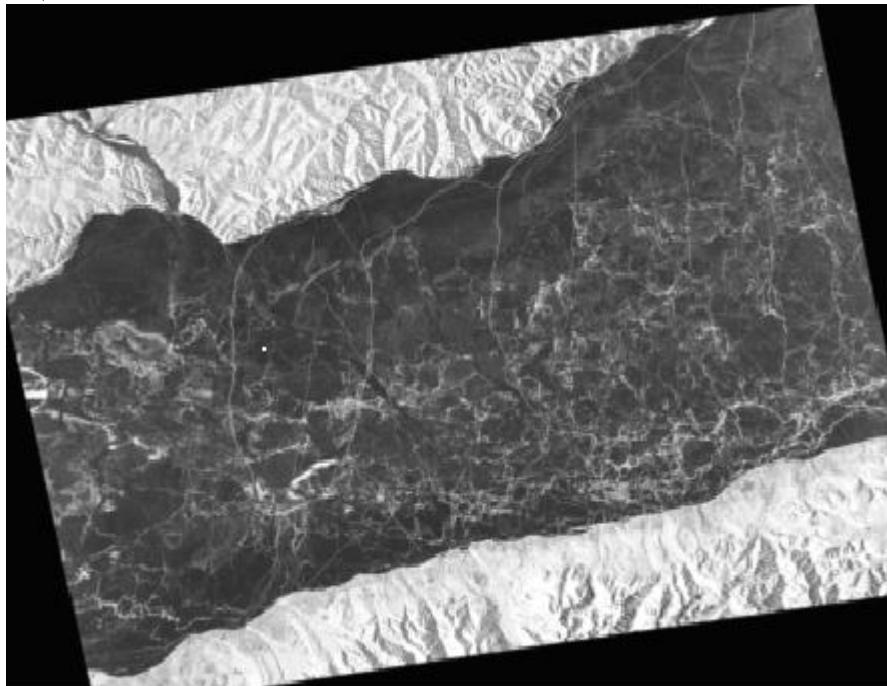


Рис.1. Структура ледового покрова южной части оз. Байкал по данным ALOS PALSAR на 8 марта 2010 года.

Текстурные характеристики второго порядка, таких как диапазон значений, вариация, контраст и т.п. показывают сходные результаты. Установлено, что для ледового покрова в среднем перепад значений интенсивности составляет порядка 15% от максимального уровня; трещины, зон деструкции отличаются более высокими значениями – от 50% и выше. Следовательно, наблюдения изменений диапазона значений также позволяет оценить активность (подновление - залечивание) отдельных нарушений ледового покрова. Отслеживание показателя вдоль становых трещин показало, что максимальные вариации диапазона значений наблюдаются в прибрежной зоне, где происходит быстрое наращивание (залечивание – сжатие) ледового покрова, сменившиеся после 8-марта растяжением (растрескиванием) прибрежного массива. Для других частей становой трещины – активизированной границы крупного ледового блока, затянутой тонким молодым льдом – характерны меньшие изменения диапазона значений. Для этих точек относительный минимум диапазона значений достигается 7 февраля 2010 г., когда температура воздуха достигла зимнего минимума, а подвижки на межблоковых границах из-за малых перепадов суточных температур стали минимальными.

Для характеристики локальных особенностей мезо- и макро-уровня хорошо подходят такие текстурные характеристики как энтропия, однородность, несхожесть. Так энтропия ледового покрова принимает максимальные или близкие к максимуму значения для 70% пикселей. Сильные вариации показателя связаны в основном с изменениями на суше - здесь энтропия падает практически до 0. На ледовом поле

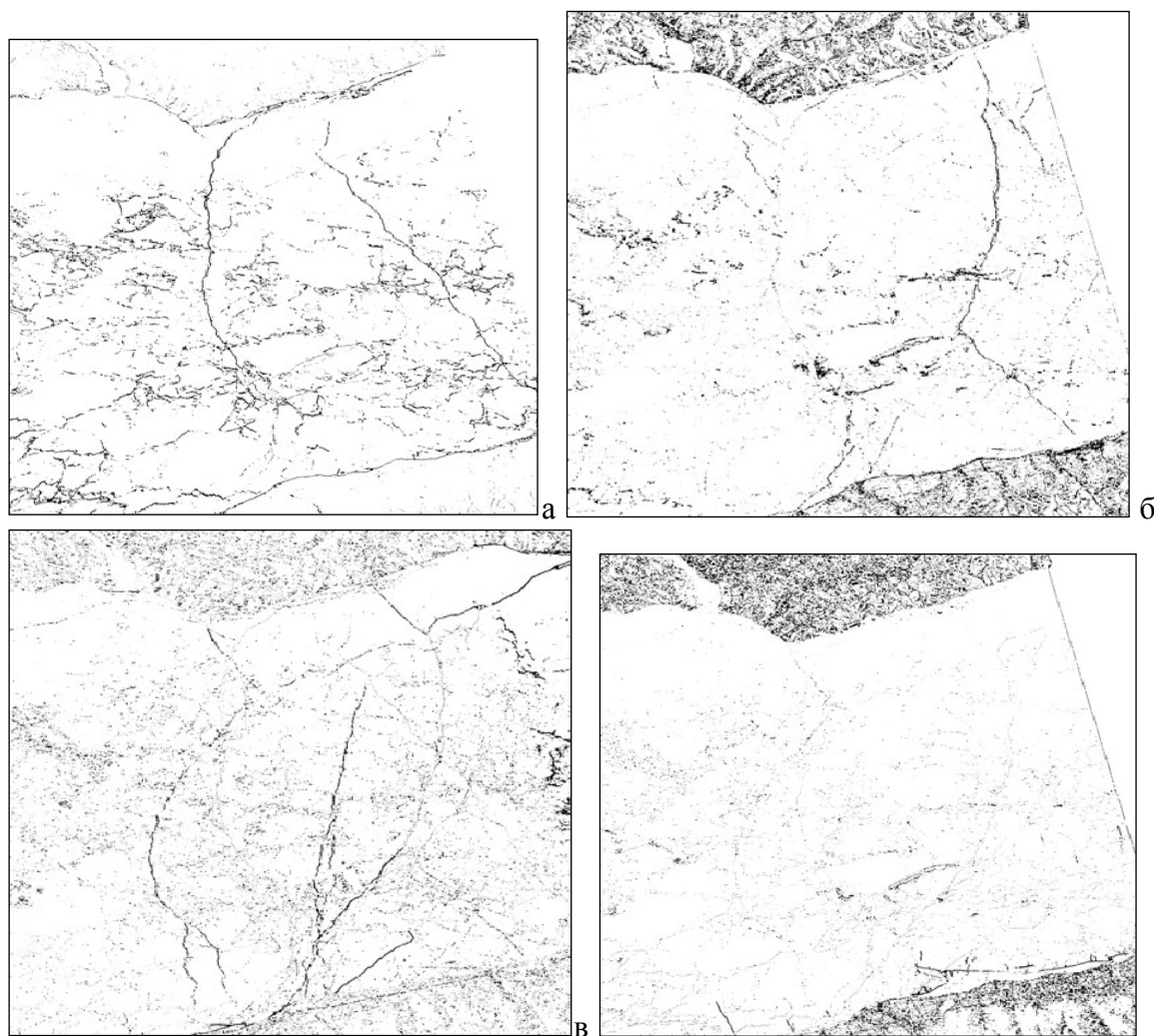
заметное уменьшение энтропии происходит на станových трещинах. Изменения энтропии с течением времени в среднем невелики от -0,4% до 2,3%, но по станovým трещинам изменения на порядок выше и составляют более 30%. Например для становой трещины Т1, замеры в 5-ти точках показали, что к началу февраля происходит небольшой рост, что связано с продолжающимся процессом подвижки ледовых плит, к началу марта происходит резкое падение энтропии (по сравнению с почти стабильными фоновыми значениями). Рост упорядоченности, вероятно, соответствует «залечиванию» трещин на границах крупных блоков ледовых плит.

Показатель однородности ледового покрытия Байкала составляет в среднем 0,3. Максимальные значения ≈ 1 характерны для относительно гладких льдин и ровных участков суши, покрытых снегом. Для трещин в ледовом панцире характерны низкие значения показателя близкие к 0. К началу марта на тестовом ледовом участке происходит незначительное уменьшение однородности на 0,18%, с последующим увеличением на 96%. Для станových трещин изменения однородности имеют противоположное направление.

Выделение трещин на основе текстурных характеристик ледового покрова.

Образование и динамика трещин в ледовом покрове Байкала отчётливо прослеживается на радарных изображениях по их интенсивности. В конце января в результате кратковременного существенного повышения температуры (на 25 С в течение 28 января) на участке от пос. Листвянка до пос. Большие Коты и далее наблюдались мощные надвиги ледового покрова на береговую линию и сформировались минимум две конвергентные межплитные границы (зоны поддвига) Т1 и Т2. Трещина Т1 распространяется от пос. Большие Коты вдоль береговой линии, в районе мыса Лиственичный трещина резко поворачивает, и в субмеридиональном направлении пересекает акваторию озера. Трещина Т2 начинается от мыса Кадильного и проходит на удалении 10 км, параллельно берегу. Суммарная величина надвиговых смещений по трещинам Т1 и Т2 в этот период достигала 10-11 м. Наиболее эффективным оказался метод выделения векторных слоёв, построенных на базе алгоритмов классификации. На векторизованном изображении 7 февраля, 8 и 25 марта достаточно четко наблюдается развитие трещины Т2 – от отдельных фрагментов на снимке 7 февраля – до единой системы – пересекающей всю акваторию озера (на изображениях 8 и 25 марта). Усиление деформаций ледового покрова в средней части акватории фиксируется на снимке 8 марта. В интервале между 8 марта-25 февраля происходит интенсивное залечивание оперяющих трещин зоны подвига Т1 в прибрежной части, залечивание части межблоковых и внутриблоковых трещин ледового покрова посередине озера.

Сравнивая векторные слои одного и того же класса, полученные в разное время, можно выявить общую структуру и её изменения. На рис.2.а можно видеть основные черты плитной структуры ледового покрова 2010 года сформировавшиеся ещё в конце января: становая трещина Т1 и трещина разрыва Т4 (длиной 30 км), также начинает формироваться вторая становая трещина Т2 (длина 10 км). Формирование плитной структуры продолжается в феврале (рис.2.б) и завершается к 8 марта (рис.2.в). В интервале между 8 и 25 марта каких-либо крупных изменений ледового покрова – образования новых блокоразделов и станových трещин не происходило (рис.2.г), можно только отметить систему новых небольших трещин возле южной береговой линии.



Г

Рис.2. Динамика структуры трещин ледового покрова озера Байкал в период за январь-март 2010 года а) постоянная структура, общая на период наблюдения; б) новые трещины, появившиеся между 21 января и 7 февраля, в) между 7 февраля и 8 марта и г) между 8 и 25 марта.

Заключение

Текстурный анализ радарных изображений 2010 года показал высокую информативность параметров первого порядка (среднее значение, энтропия, однородность), характеризующих локальные свойства ледового покрытия на мезоуровне и второго порядка (разброс значений яркости, диапазон значений, вариации, контраст и т.п.) при картировании структуры ледового покрова озера Байкал и изучении динамики трещин. Сравнение текстурных характеристик мультитременных радарных изображений позволяет выявлять образующиеся или усиливающиеся линии подвижек или разрыва, а также зоны «залечивания - обновления» (сжатия – растяжения) трещин. Значения этих параметров в области трещин в 2-3 раза превышают фоновые, а относительные изменения данных параметров на трещинах на порядок выше аналогичных изменений фона.

Результаты анализа текстурных характеристик хорошо согласуются с наземными данными о динамике ледового покрова в прибрежной зоне (Листвянка). В частности, подтверждается формирование плиточной структуры к началу февраля и отсутствие значительных подвижек ледового покрова в феврале-марте 2010 года, причём не только

в прибрежной зоне, но и вдали от берега. Для определения более тонкой структуры трещин лучше использовать всю совокупность характеристик первого и второго порядка. Сравнение текстурных характеристик мультивременных радарных изображений позволяет выявлять образующиеся или усиливающиеся линии подвижек или разрыва, а также зоны «залечивания - обновления» (сжатия – растяжения) трещин.

Исследования выполнены при поддержке Междисциплинарного интеграционного проекта СО РАН №20 «Физическое моделирование деформационных процессов различного уровня в литосфере на основе исследования ледового покрова озера Байкал» (координатор д.ф.-м.н.Псахье С.Г.), JAXA for provision of PALSAR data under RA project №102.

Радарные данные получены по гранту Японского аэрокосмического агентства 09/JAXA/AEO "Study of topography and geology of Baikal region using optical and radar ALOS data".

Литература.

1. Псахье С.Г., Ружич В.В., Грачев М.А., Гольдин С.В., Гранин Н.Г., Борняков С.А., Шилько Е.В., Астафуров С.В., Димаки А.В., Тимофеев В.Ю., Гнатовский Р.Ю., Ченский А.Г., Черных Е.Н., Тирских Д.С., Дядьков П.Г., Добрецов Н.Н. Использование ледового покрова озера Байкал в качестве модельной среды для изучения закономерностей развития деформационных процессов в средах с блоковой структурой Международная конференция по физической мезомеханике и компьютерному конструированию и разработке новых материалов MESOMECH-2006, 19-22 сентября 2006 г., Томск.
2. Psakhie S.G., Dobretsov N.L., Shilko E.V., Astafurov S. V., Dimaki A.V., Ruzhich V. V. Model study of the formation of deformation-induced structures of subduction type in block-structured media. Ice cover of Lake Baikal as a model medium // *Tectonophysics.* - 2009. - V.465. - PP. 204-211
3. 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.
4. Татьков Г.И. Раздел 4.2. Сейсмичность // *Энциклопедический справочник «Бурятия».* Том. 1. Природа. Общество. Экономика. Улан-Удэ. ЭКОС, 2011, С. 40-42.
5. Чимитдоржиев Т.Н., Захаров А.И., Татьков Г.И. Предварительные результаты оценки геодинамических процессов в центральной части Байкальского рифта по данным радарной интерферометрии ALOS PALSAR и оптическим изображениям SPOT // *Журнал радиоэлектроники,* № 4, 2010. http://jre.cplire.ru/jre/library/Ulan-Ude-2010/pdf/c1_17.pdf
6. Харалик Р. М. Статистический и структурный подходы к описанию текстур ТИИРЭ. 1979. СС.98-118.
7. Patric C. Chen and T. Pavlidis. Segmentation by Texture Using Correlation. 551-553.
8. Andre Gagalowicz and Song De Ma. Sequential Synthesis of Natural Textures Computer Vision. Graphics and Image Processing 30. 1985. PP. 289-315.
9. Haralick, R. M., Shanmugan, K., and Dinstein, I. Textural Features for Image Classification // *IEEE Transactions on Systems, Man, and Cybernetics.* 1973.Vol. 3. No. 6. PP. 610-621.