

**ПРЕДВАРИТЕЛЬНЫЕ РЕЗУЛЬТАТЫ ОЦЕНКИ ГЕОДИНАМИЧЕСКИХ ПРОЦЕССОВ В
ЦЕНТРАЛЬНОЙ ЧАСТИ БАЙКАЛЬСКОГО РИФТА ПО ДАННЫМ РАДАРНОЙ
ИНТЕРФЕРОМЕТРИИ ALOS PALSAR И ОПТИЧЕСКИМ ИЗОБРАЖЕНИЯМ SPOT.**

Чимитдоржиев¹ Т.Н., Захаров² А.И., Татьков³ Г.И.

1- Отдел физических проблем БНЦ СО РАН, г. Улан-Удэ,

2- Фрязинский филиал института радиотехники и электроники РАН, г. Фрязино,

3- Геологический институт СО РАН, г. Улан-Удэ

ВВЕДЕНИЕ

С увеличением количества микроволновых и спектрально-оптических сенсоров все более расширяются возможности многодиапазонного дистанционного исследования состояния и динамики земных покровов. В качестве одной из актуальных задач совместных оптико-микроволновых аэрокосмических исследований следует выделить мониторинг геодинамических процессов сейсмоопасных территорий для снижения риска и уменьшения последствий сильных землетрясений.

Как показали результаты выполнения междисциплинарных интеграционных проектов СО РАН [1, 2], перспективной модельной физической системой для исследования закономерностей деформационных процессов в квазидвумерных блочных (плитных) средах является ледовый покров озера Байкал. Как известно, лед на крупных водных объектах достаточно остро реагирует на геотектонические и сейсмические процессы в земной коре, что позволяет использовать ледовый покров в качестве некоторого индикатора подобных явлений или использовать в качестве основы для физического моделирования. Соответственно выяснение параметров деформаций, как отдельных фрагментов ледового покрова, так и его пространственного перемещения в целом необходимы для более глубокого понимания динамики деформирования ледового покрова, его механического разрушения, сопровождающегося сейсмическими явлениями.

В последние годы отмечается увеличение сейсмической активности в зоне Байкальского рифта. При этом как показывают результаты наземных геофизических наблюдений, наибольшее количество подземных толчков отмечается в акватории оз. Байкал, т.е. наибольший интерес представляет подводная часть. Поскольку проведение измерений под водой не всегда возможно и достаточно трудоемко, а измерения на льду носят дискретный характер, то предлагается использовать оптико-микроволновые методы дистанционного зондирования ледового покрова. При этом в качестве полигона исследований был выбран мелководный залив Провал, покрытый льдом с ноября по май.

Для исследований предлагается использовать оптико-микроволновые снимки зимнего периода: оптические спектрально-оптические изображения SPOT и данные радиолокационной интерферометрии ALOS PALSAR. Данные спутника SPOT предоставлены информационной

Зондирование земных покровов радарми с синтезированной апертурой

системой спутниковых данных СО РАН, радарные изображения получены по соглашению с японским космическим агентством JAXA.

ОПИСАНИЕ РАЙОНА ИССЛЕДОВАНИЙ.

Для оценки возможностей интерферометрии применительно к мониторингу зимних деформаций земной поверхности в качестве тестового полигона нами был выбран участок суши в дельте реки Селенги, находящейся в центральной зоне Байкальского рифта, которая характеризуется высокой сейсмической активностью (рис.1).

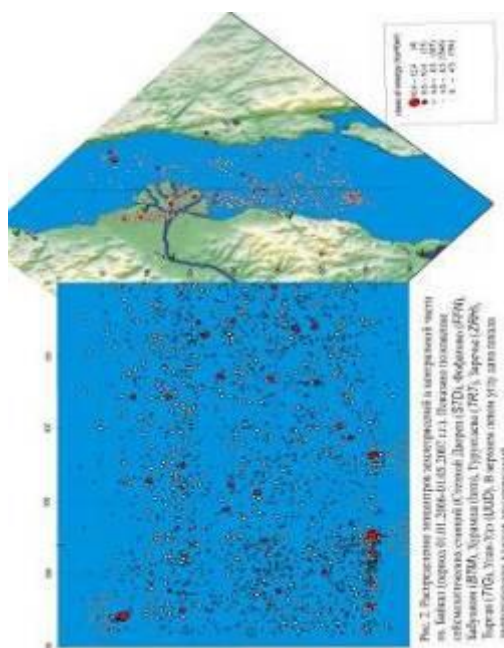


Рис.1. Распределение эпицентров землетрясений в центральной части оз. Байкал. В верхнем правом углу дана шкала энергетических классов землетрясений.

Дельта Селенги является уникальным природным образованием, сформировавшимся в результате сложного взаимодействия природных факторов и гидродинамических процессов. Селенга и ее дельта играют огромную роль в жизни Байкала. На долю р.Селенги приходится 53% водосбора озера (28,9 куб.км), ежегодно она сбрасывает в водоем 2,7 млн.тонн твердого стока. За более чем 140-летний период сейсмонаблюдений в районе произошло пять катастрофических землетрясений (1862, 1871, 1885, 1903, 1959 годов). При наиболее сильном – Цаганском (12.01.1862 г. в 07^h19^m с $M=7.5$), образовался залив Провал и было затоплено 220 км² суши. За 40 лет инструментальных сейсмологических наблюдений (1967-2006 г.г.) зарегистрировано 20564 землетрясения с $K_p=5-14$., сильнейшими из которых считаются Среднебайкальское (29.08.1959 г.; $M_L=6.8$) и Байкальское (28.03.1970 г.; $M_L=5.5$). Здесь на протяжении 10 лет действует Селенгинская локальная сеть наблюдений, отличающаяся более высокой представительностью

Зондирование земных покровов радарми с синтезированной апертурой

регистрации сейсмических событий и повышенной точностью локализации гипоцентров землетрясений (см. рис.1).

Район исследований почти полностью перекрыт толщей кайнозойских отложений, подразделяющихся на неогеновые и четвертичные. Фундамент впадины и толща осадков разбиты на блоки тектоническими нарушениями северо-восточного и северо-западного взаимно перпендикулярных направлений, перекрытыми осадками. По данным детальным сейсмонаблюдений в западной части дельты выявлена современная Посольская подзона сдвиговой деформации, субмеридионального направления. Подзона отмечается зигзагообразным характером эпицентрального поля с пологим погружением сейсмофокальных структур в северо-восточном и юго-восточном направлениях. С северо-востока к Посольской сейсмогенерирующей структуре примыкает Сухинская подзона преимущественно раздвиговых деформаций, что свидетельствует о продолжающемся развитии (с элементами сдвига и вращения) системы рифтовых сбросов.

Залив Провал, как указывалось выше, образовался в результате землетрясения 12 января 1862 г. с магнитудой порядка 7.5, когда часть дельты и прилегающей равнины Цаганской степи резко опустилась на площади 220 кв.км. Залив Провал представляет собой мелководный участок с восточной стороны дельты реки Селенга, ограниченный узкой песчаной косой в нескольких местах на глубине порядка 1- 3 м. Максимальные глубины составляют 3-4 м (рис.2). Залив покрывается льдом в ноябре, редко в декабре, и промерзает на максимальную глубину до 1.5-1.6 м в середине-конце февраля.

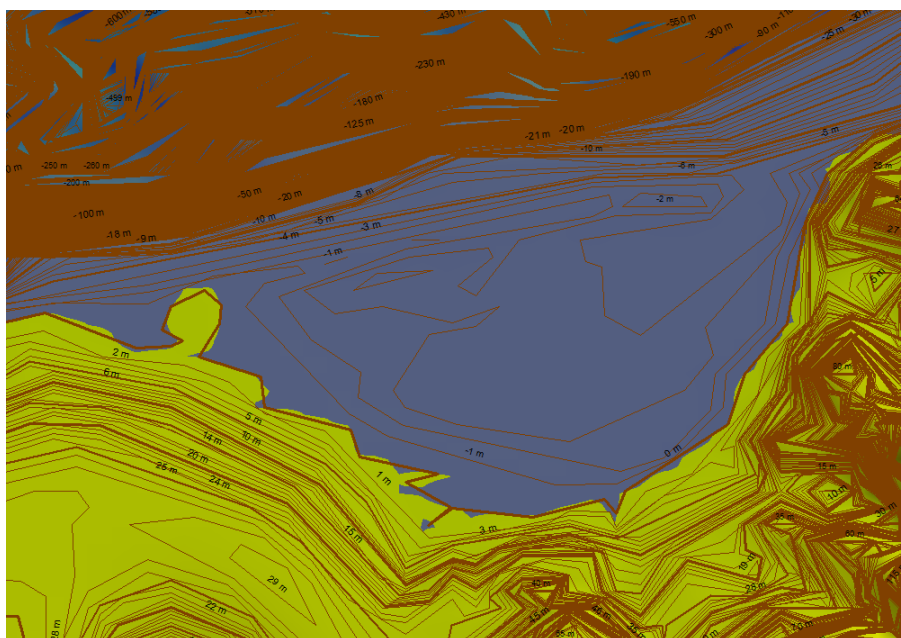


Рис.2. Рельеф дна и местности вблизи залива Провал.

МЕТОДИКА ИССЛЕДОВАНИЯ И ПРЕДВАРИТЕЛЬНЫЕ РЕЗУЛЬТАТЫ

Для обнаружения ледовых трещин были использованы спектрзональные оптические снимки SPOT полученные в 2008-2010гг. По этим данным в течение ледового периода в

Зондирование земных покровов радарми с синтезированной апертурой

указанные годы отмечается наличие ледовой трещины в одном месте: от п. Оймур на северо-запад по льду залива Провал. На рис.3 квадратиком обозначен п. Оймур.

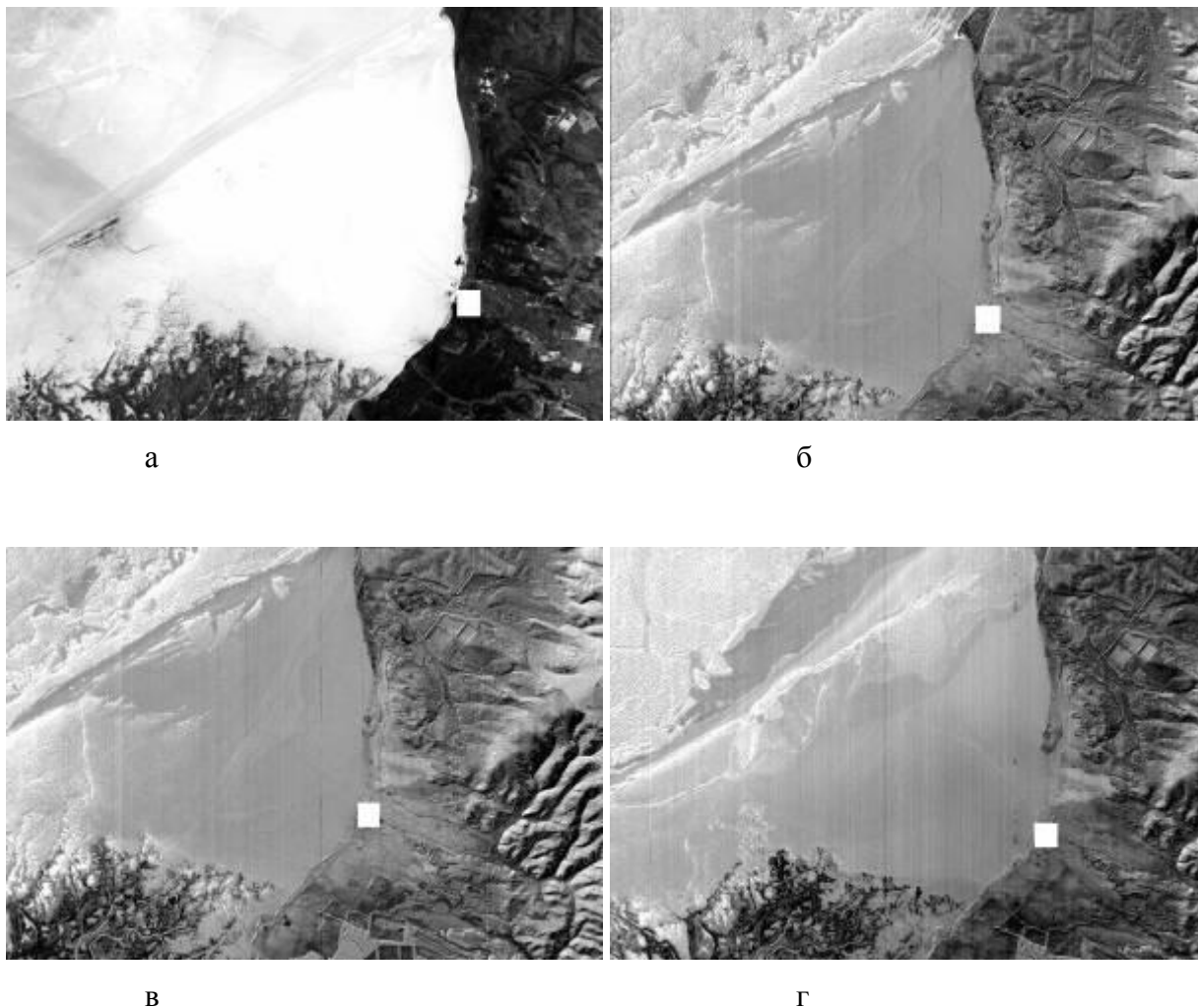


Рис.3. Спектрональные оптические изображения SPOT: а – третий канал SPOT-2 за 31 марта 2008г., б – четвертый канал SPOT-4 за 11 февраля 2009г., в – четвертый канал SPOT-4 за 15 февраля 2009г., г – четвертый канал SPOT-4 за 10 февраля 2010г.

При сравнении местоположения основных линеаментов в районе залива с обнаруженной ледовой трещиной можно предположить, что последняя является продолжением разлома, обозначенного желтым цветом на следующем рис. 4. Указанный на схеме разлом проходит через заболоченный участок местности в районе п. Оймур. Другие разломы в центральной части рифта обозначены зеленым цветом, голубыми стрелками указаны направления сдвиговых деформаций, красными линиями – сбросовые разломы, красными кружками – эпицентры землетрясений за 2007-2009гг. Магнитуда последних соответствует диаметру.

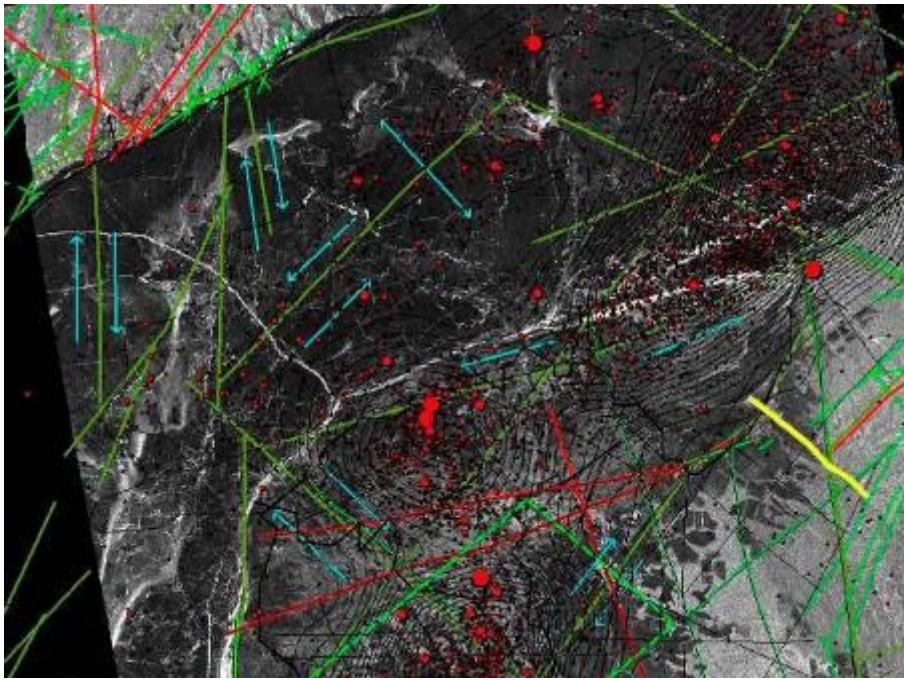


Рис. 4. Схема расположения линеаментов в районе дельты р. Селенга.

Поскольку данные оптических спутниковых наблюдений демонстрируют лишь наличие ледовой трещины, возможно возникшей в результате подземных толчков и последующих деформаций геоблоков, то предлагается использовать радарную интерферометрию со значительной временной базой и предпочтительно указанного ранее ледового периода.

Радиолокационная интерферометрия в настоящее время стала мощным инструментом для мониторинга различных изменений природной среды, при этом наиболее востребованным и актуальным направлением данных исследований является количественная оценка смещений геоблоков разного масштаба. Радиолокационная съемка поверхности Земли выполняется обычно в X, C, L диапазонах, с длиной волны, соответственно, около 3 см, 6 см и 23 см. Как показывают многочисленные примеры использования интерферометрии, L диапазон оказывается наиболее привлекательным для целей мониторинга площадных деформаций земной поверхности, поскольку он менее чувствителен к искажающему влиянию изменений состояния растительности, снегового покрова, мелкомасштабного рельефа поверхности, сезонным изменениям свойств отражающей среды.

Для обнаружения сезонных (зимних) деформаций подстилающей поверхности в дельте р.Селенги использовались данные радара L-диапазона (PALSAR) установленного на спутнике ALOS (Японское аэрокосмическое агентство JAXA). Радар предназначен для круглосуточного и всепогодного наблюдения Земли и позволяет, в зависимости от режима сканирования (FBS, FBD, SkanSAR, PLR и режим прямой передачи данных) получать изображения с пространственным разрешением от 10 до 100 м в полосе съемки шириной от 40-70 км до 250-350 км. Основным преимуществом радара PALSAR перед другими современными радарми, например, ERS-1,2, является его функционирование в более длинноволновом диапазоне, что в большинстве случаев

Зондирование земных покровов радарными с синтезированной апертурой

решает проблему временной декорреляции отраженных сигналов, вызванной упомянутыми выше изменениями растительного и снежного покровов, а также флуктуациями электрических свойств атмосферы. При этом режим съемки PALSAR PLR (поляриметрический режим съемки) позволяет повысить уровень когерентности отраженных сигналов за счет подбора оптимальных видов поляризации сигнала. Данные режима FBS (однополяризационный - HH или VV режим съемки) характеризуются наиболее высоким пространственным разрешением порядка 7 м, что позволяет получить наиболее детальную картину смещений участков поверхности. Можно утверждать, что данные ALOS PALSAR характеризуются наиболее высокой детальностью и высокой интерферометрической когерентностью по сравнению с данными других радаров, даже несмотря на то, что минимально возможный временной интервал между двумя последовательными съемками равен 46 дням.

Для данного участка была выбрана интерферометрическая пара снимков (рис.5) ALOS PALSAR, полученная в режиме FBS на согласованной горизонтальной поляризации. Этот режим с высокой разрешающей способностью является основным рабочим режимом в том числе и для интерферометрических наблюдений. Съемка выполнялась зимой 2009 года. Перпендикулярная база составляет 350 м. При учете особенностей рельефа использовалась цифровая модель рельефа SRTM с разрешением 90 м. При расчете интерферограммы были использованы традиционные этапы обработки сигнала:

- совмещение изображений;
- формирование интерферограммы;
- построение изображения когерентности;
- фильтрация шумов интерферограммы;
- «компенсация» для гладкой Земли;
- развертка фазы.

Рассмотрим кратко этапы обработки.

Совмещение изображений – можно выполнить с помощью преобразования

$$\begin{aligned}x' &= a_{11}x + a_{12}y + c_1 \\y' &= a_{21}x + a_{22}y + c_2\end{aligned}$$

где (x, y) и (x', y') – декартовы координаты на первом и втором снимках. Неизвестные преобразования могут быть определены путем нахождения координат идентичных точек на изображениях. Другим методом является попиксельный корреляционный анализ.

Формирование интерферограммы происходит в результате перемножения комплексных сигналов первого изображения S_1 первого изображения на комплексно-сопряженные сигналы S_2^*

Зондирование земных покровов радарми с синтезированной апертурой

второго изображения. В результате определяем интерферометрическую фазу (разность фаз) Φ :

$$\Phi = \operatorname{arctg} \frac{B}{A},$$

где A и B – квадратурные составляющие полученного произведения.

Построение карты когерентности производится по формуле:

$$\gamma = \frac{|E \{S_1 * S_2^*\}|}{\sqrt{E \{|S_1|^2\} \cdot E \{|S_2|^2\}}},$$

где $E\{\cdot\}$ – операция усреднения. Карта когерентности показывает степень корреляции изображений.

Фильтрация шумов интерферограммы уменьшает влияние шумов за счет уменьшения пространственного разрешения изображения. Наиболее просто выполняется локальная линейная фильтрация масками с размерами $n \times n$, где $n = 3, 5, 7$. фактически такие фильтры являются фильтрами нижних частот, подавляющие высокочастотные гармоники сигнала и шума.

Компенсация интерферограммы гладкой Земли, с радиусом, соответствующим средней высоте рельефа, из измеренной интерферограммы производят для того, чтобы устранить интерференционные полосы вследствие изменения разности фаз вдоль гладкой земли за счет изменения наклонных дальностей. Результирующая интерферограмма описывает только вариации высот рельефа.

Развертка (разворот) фазы является этапом, цель которого устранение фазовой неоднозначности. Значения интерферометрической фазы заключены в пределах $(-\pi, \pi)$ и известны с точностью до целого числа циклов. Задача развертки заключается в восстановлении фазы путем добавления нужного числа циклов. Данная задача является наиболее сложной в проблеме создания цифровой модели рельефа.

Последний этап в данном исследовании не рассматривается вследствие значительной временной декорреляции интерферометрической пары изображений по акватории оз. Байкал, прилегающей к заливу и соответственно существенных ошибок при развертке фазы. Это связано с тем, что за время между съемками происходило становление сплошного ледового покрова – от частично водной поверхности (см. рис.5-а) до сплошной ледовой поверхности (см. рис.5-б). Как правило, залив Провал покрывается льдом в ноябре, и на момент выполнения съемки был полностью покрыт льдом, что повлияло на интерферометрическую когерентность (см. рис. 5-в) в районе залива. Залив Провал на изображениях расположен восточнее (справа) дельты р. Селенга

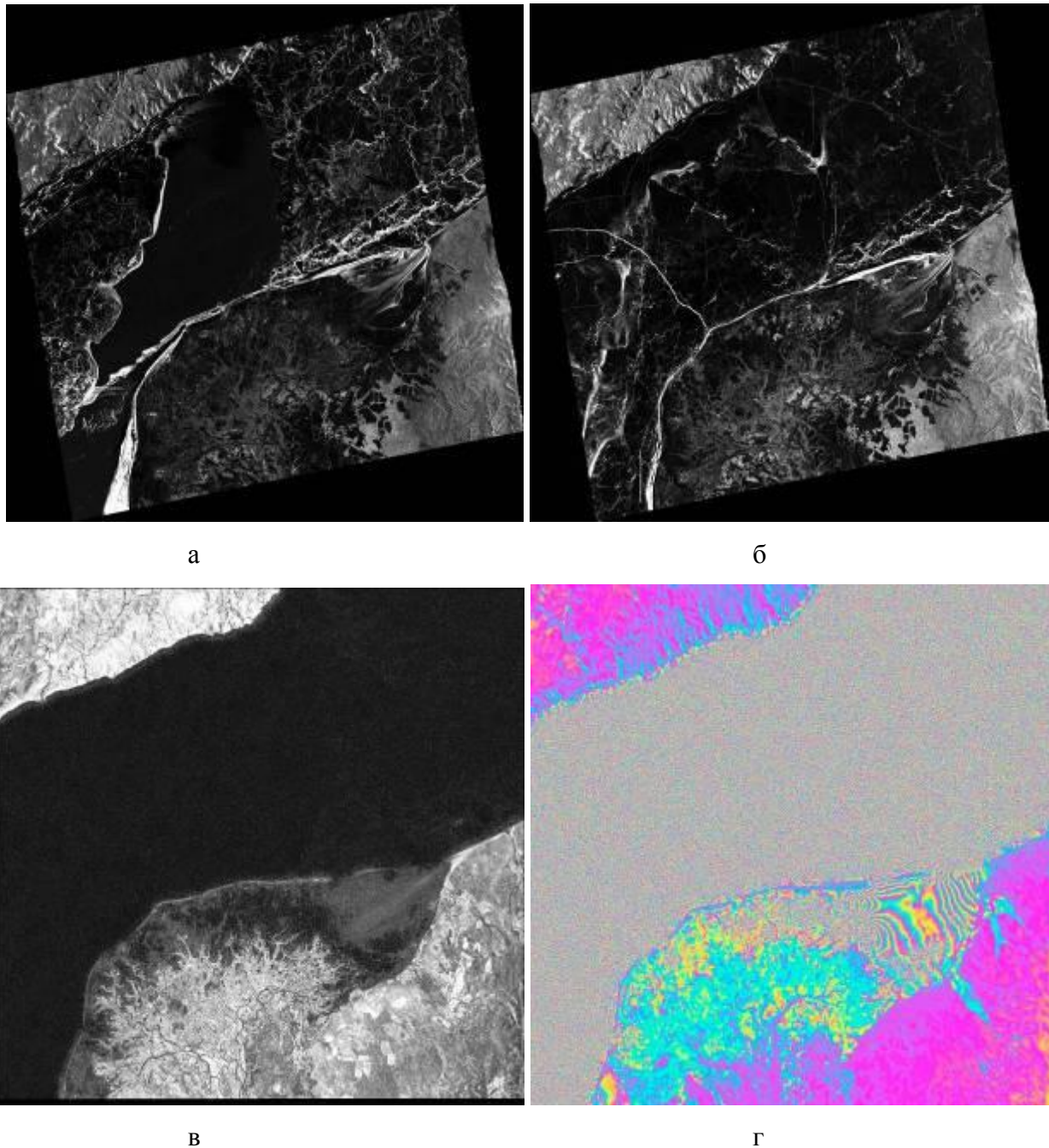


Рис. 5. Радиолокационные изображения района исследований: а – становление ледового покрова, б – сплошной ледовый покров, в – изображение когерентности, г – интерферограмма.

На рис. 5-г представлена рассчитанная интерферограмма, на которой в районе залива отмечаются интерференционные полосы, свидетельствующие о смещениях ледяного покрова. Рассмотрим более детально данный фрагмент интерферограммы без разворота фазы на рис.6. Голубым цветом на сухопутной части интерферограммы выделены участки местности, поднявшиеся за промежуток времени между съемками на 1-2 см. Данные участки соответствуют обводненным заболоченным почвам, которые вспучились вследствие глубинного промерзания.

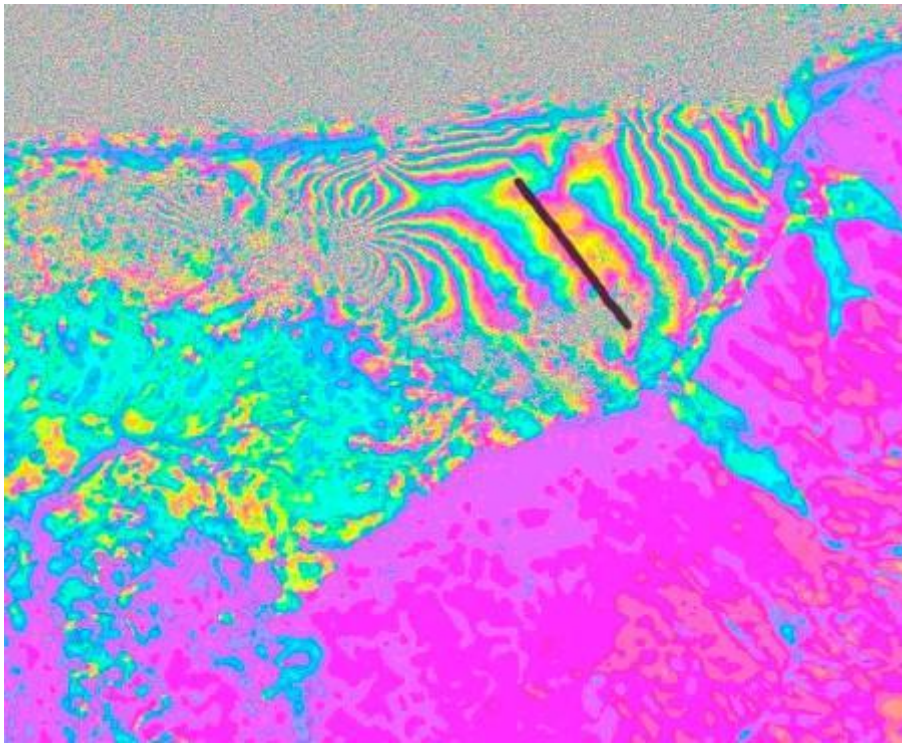


Рис.6. Фрагмент интерферограммы.

Что касается ледовых деформаций в заливе, то можно отметить некоторую прямолинейную границу раздела, выделенную черным цветом на рис.6. Данная граница раздела совпадает, с обнаруженными ранее по оптическим снимкам, ледовыми трещинами. Происхождение, которых вероятно связано с деформациями земной коры по одному из разломов, как указывалось выше. В зимний период увеличивается толщина ледяного покрова, который достигает до 1.5-1.6 м. При этом в районе песчаной косы разделяющей залив и основную часть Байкала происходит уменьшение «окна» между льдом и песчаной отмелью. Вместе с тем происходит постоянный приток водной массы из реки Селенга, вследствие чего отмечаются сдвигово-деформационные процессы ледового покрова по ледовой трещине.

Данный результат является предварительным и нуждается в наземной валидации. Однако, резюмируя выше изложенное можно полагать, что разлом является активным.

С целью количественной оценки динамики геоблоков рассмотрим результаты интерферометрии с более значительной временной базой - 2007-09гг. Ниже представлена интерферограмма для пары 2007-2009 (различие - два года), с перпендикулярной базой 342 м. Последнее позволяет утверждать, что в данном случае влияние рельефа сведено к минимуму и на интерферограмме выделяются участки, свидетельствующие о геодинамике данного участка. Также удалось получить развертку фазы, которая была переведена в значения вертикальных смещений (рис.7-а). Горизонтальных сдвигов обнаружить не удалось.

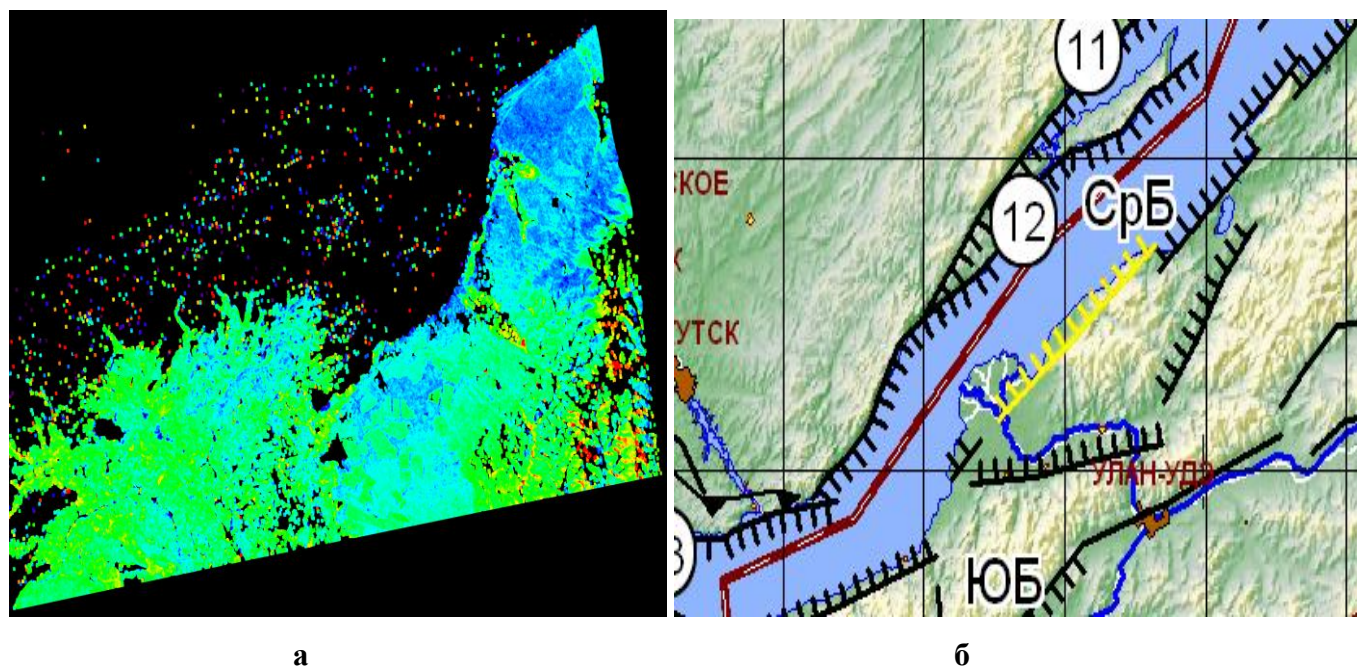


Рис.7. Район исследований: а – на интерферограмме, б – на карте.

На рис.7-а синий цвет соответствует просадке поверхности за период с 2007 по 2009 гг. на $1.5\div-2$ см. При этом обнаруженное отрицательное вертикальное смещение возможно связано с геологическим разломом типа «сброс», который выделен на рис.7-б желтым цветом.

Заключение.

В целом проведенные исследования носят предварительный характер и нуждаются в дополнительных наземных геофизических и радарных интерферометрических измерениях. В качестве основного результата можно утверждать об активности линеамента в районе п. Оймур и вероятной динамике опускания сухопутной части дельты. При этом рассчитанная по интерферограмме динамика восточнее данного населенного пункта более значительна.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. 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
2. 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.