



Научный центр
оперативного
мониторинга Земли
ОАО "Российские
космические системы"



А.А.Феокти
стов,
А.И.
Захаров,
П.В.
Денисов,
М.А.Гусев

Основные результаты
интерферометрической
обработки данных
космических
радиолокаторов с
синтезированной
апертурой ХИЛ

ИХ Всероссийская открытая конференция
"Современные проблемы
дистанционного зондирования Земли из космоса"
ИКИ РАН 14-18 ноября 2011 г.

В Научном центре оперативного мониторинга Земли (НЦ ОМЗ) начаты работы по созданию и отработке полного технологического цикла обработки данных перспективных **Боновых** **РСА** в **ВНИИ** в рамках проводимых работ уделяется вопросам интерферометрической и дифференциальной интерферометрической обработки.

Реальные работы в НЦ ОМЗ начаты примерно год тому назад. Начаты с нуля.

В докладе представлены основные результаты первого цикла интерферометрической обработки данных:

- РСА **COSMO-SkyMed** (Италия), работающего в коротковолновом диапазоне (3,1 см);
- РСА **ALOS/PALSAR** (Япония), работающего в

т.е. и длинноволновом, и длинноволновом, L-диапазоне (23 см).
диапазонов длин волн, используемых в современных космических РСА.

При проведении обработки
одновременно использовались:

- программный пакет
SARscape 4.3, созданный
фирмой **Sarmap s.a.**,
Швейцария;

- российский
программный пакет
Photomod Radar 1.2.3,
созданный фирмой
РАКУРС, Москва и
который должен быть
использован в качестве
базового программного
средства обработки
данных перспективных

**1. ОСНОВНЫЕ РЕЗУЛЬТАТЫ
ОБРАБОТКИ, ПОЛУЧЕННЫЕ С
ИСПОЛЬЗОВАНИЕМ
ИЗОБРАЖЕНИЙ РСА COSMO-SkyMed
(X-диапазон 3,1 см)**

Маршрутный режим съемки **HIMAGE** с пространственным разрешением **3 м** и размером кадра **40x40 км²**.

1.1. ОСНОВНЫЕ РЕЗУЛЬТАТЫ, ПОЛУЧЕННЫЕ НА ЭТАПЕ СОВМЕЩЕНИЯ ИЗОБРАЖЕНИЙ

Наиболее интересные результаты удалось получить по **Амурской области**:

- набор данных - **15** изображений РСА **COSMO-SkyMed**;
- сроки проведения съемки с **11** ноября **2009** г. по **22** января **2010** г.;
- общий временной интервал - **72** суток.

С использованием **15** изображений **COSMO-SkyMed** были сформированы **3** серии интерферометрических пар изображений.

Общие принципы формирования

каждой серии:

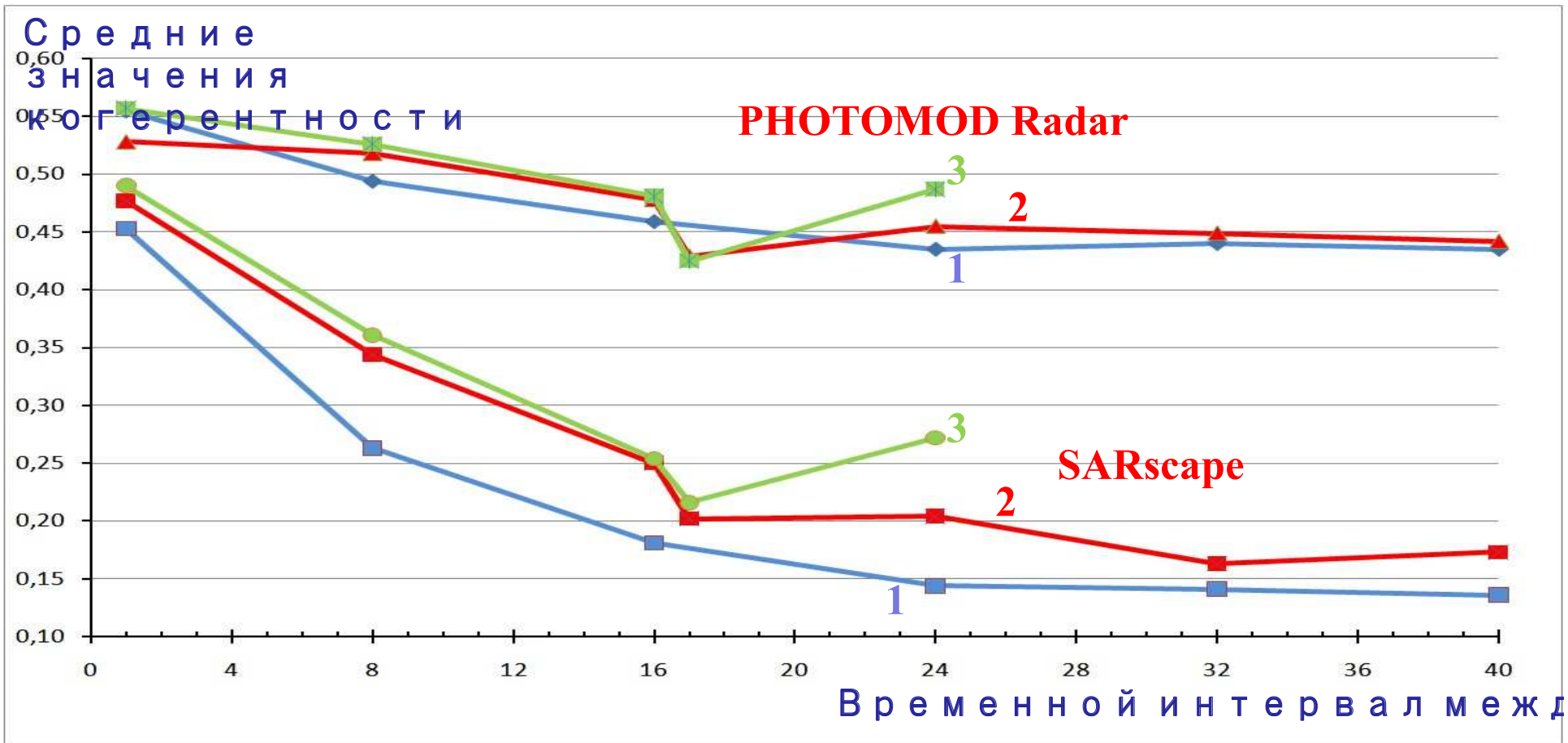
- **первое** из изображений каждой серии выбиралось в качестве **основного**;
- в качестве **вспомогательных** изображений интерферометрических пар поочередно **выбирались** **последующие** по времени **съёмки** изображения;
- серия **заканчивалась** после того, как **совмещение** изображений **оказывалось**

Для количественной оценки качества совмещения использовались средние по площади изображений значения когерентности – после выполнения операции усреднения (**Multilooking**) с коэффициентами по дальности и азимуту, равными, для расчета средних значений когерентности, 5 и 4. в каждом пакете использовались свои собственные программные средства – это важно.

Для получения оценки когерентности для каждого пикселя изображения в обоих пакетах использовалось одно и то же ст

$$C = \frac{\left| \sum_{x=0}^{X-1} \sum_{y=0}^{Y-1} I_1(x, y) \cdot I_2^*(x, y) \right|}{\sqrt{\sum_{x=0}^{X-1} \sum_{y=0}^{Y-1} |I_1(x, y)|^2 \sum_{x=0}^{X-1} \sum_{y=0}^{Y-1} |I_2(x, y)|^2}}$$

где $I_1(x, y)$ и $I_2(x, y)$ - значения сигнала основного и вспомогательного изображений интерферометрической пары, * - знак комплексного сопряжения, X и Y - размеры области по дальности и азимуту (окна), которые по умолчанию задавались в результате тз (порядок отбора в рафьяев) в виде (по оси X отложены значения временного интервала между съемками основного и вспомогательного изображений каждой интерферометрической пары, а по оси Y



Сверху – зависимости для **3** серий изображений, полученные с помощью пакета **PHOTOMOD Radar**, внизу – с помощью **SARscape**. Совмещение удалось выполнить для серий **1** и **2** с временными интервалами между съемками основного и вспомогательных изображений от **1** до **40** суток и для серии **3** с интервалами от **1** до **24** суток. В среднем значения когерентности по данным **PHOTOMOD Radar** падают примерно на **20%** значения, полученные с помощью пакета **SARscape**, причем в наименьшем интервале в **1** сутки различия между **PHOTOMOD Radar** и **SARscape** относительно невелики - примерно **20%**. С ростом временного интервала различие достигает **10**

1.2. ОСНОВНЫЕ РЕЗУЛЬТАТЫ, ПОЛУЧЕННЫЕ НА ЭТАПЕ ПОСТРОЕНИЯ И АНАЛИЗА ЦММ

При проведении обработки использовались **3** интерферометрические пары изображений, полученные по территории Амурской области с временными интервалами между съемками основного и вспомогательного изображений в **3** интерферометрических пар **каждым** пакетом были сформированы по **3** ЦММ (ЦММ1, ЦММ2 и ЦММ3, соответственно) с размером ячейки **10** м и, далее, для каждого пакета были сформированы средние $\langle \text{ЦММ} \rangle = 1/3(\text{ЦММ1} + \text{ЦММ2} + \text{ЦММ3})$

Для оценки относительного отклонения каждой ЦММ от средней $\langle \text{ЦММ} \rangle$ для каждого пакета (и SARscape, и PHOTOMOD Radar) рассчитывались 3 разности ЦММ:

1. $\text{ЦММ1} - \langle \text{ЦММ} \rangle;$

2. $\text{ЦММ2} -$

Кроме того, для оценки отклонений от широко известной ЦММ SRTM V4 с размером ячейки 903 м

3. $\text{ЦММ3} -$

которая использовалась нами в качестве опорной) дополнительно рассчитывались еще 4 разности ЦММ:

4. $\langle \text{ЦММ} \rangle - \text{ЦММ SRTM V4};$

5. $\text{ЦММ1} - \text{ЦММ SRTM V4};$

6. $\text{ЦММ2} - \text{ЦММ SRTM V4};$

7. $\text{ЦММ3} - \text{ЦММ SRTM V4};$

Для каждой из этих 7 разностей ЦММ рассчитывались средние по площади изображений (40 x 40 км²) значения разности высот и СКО, которые и использовались в качестве

No. п / п	SARscape Разности ЦММ	Среднее значени е высоты,	СКО высоты, м
1	Разность ЦММ1 - < ЦММ >	0,15	3,92
2	Разность ЦММ2 - < ЦММ >	0,69	2,40
3	Разность ЦММ3 - < ЦММ >	-0,83	2,39
4	Разность <ЦММ> - ЦММ	-0,45	4,08
5	Разность ЦММ1 - ЦММ	-0,29	7,16
6	Разность ЦММ2 - ЦММ	0,19	4,02
7	Разность ЦММ3 - ЦММ	-1,29	3,04

SRTM V4

Средние значения **разности высот** между **3 ЦММ** и средней **<ЦММ>** меньше **1 м**.

Значения **СКО** меняются в пределах от **2 м** до **4 м**.

Средние значения **разности высот** между опорной ЦММ **SRTM V4** и **3 ЦММ**, а также средней **<ЦММ>**, практически все также лежат в пределах **1 м**.

Значения **СКО** меняются в пределах от **3 м** до **7 м**.

No. п/п	PHOTOMOD Radar Разности ЦММ	Среднее значение высоты, м	СКО высоты, м
1	Разность ЦММ1 - \langle ЦММ \rangle	-0,63	5,07
2	Разность ЦММ2 - \langle ЦММ \rangle	0,12	4,26
3	Разность ЦММ3 - \langle ЦММ \rangle	0,51	4,13
4	Разность \langle ЦММ \rangle - ЦММ	-1,37	6,39
5	Разность ЦММ1 - ЦММ	0,78	9,11
6	Разность ЦММ2 - ЦММ	1,11	8,36
7	Разность ЦММ3 - ЦММ	1,76	6,37

Средние значения **SRTM V4** разности высот между 3 ЦММ и средней \langle ЦММ \rangle , как и в случае **SARscape**, меньше **1 м**.

Однако значения **СКО** меняются уже в пределах от **4,13 м** до **5,07 м** – т.е. **увеличились** примерно в **1,5** раза по сравнению с **SARscape**. Также **увеличились** примерно в **1,5** раза и все значения **разности высот** и **СКО** между опорной ЦММ **SRTM V4** и 3 ЦММ.

2. ОСНОВНЫЕ РЕЗУЛЬТАТЫ ОБРАБОТКИ, ПОЛУЧЕННЫЕ С ИСПОЛЬЗОВАНИЕМ ИЗОБРАЖЕНИЙ РСА **ALOS/PALSAR**

L-диапазон (23 см).

Маршрутный режим съемки **FBS** с
пространственным разрешением **7**
м и размером кадра **70x70 км²**.

В рамках обработки данных РСА
ALOS/PALSAR удалось выполнить
только половину работ – анализ
точных характеристик
процедуры **совмещения**
Изображений. **корректное**
сопоставление конечных
результатов
интерферометрической обработки
– ЦММ – оказалось невозможным,
поскольку выяснилось, что
процедура импорта изображений
РСА **ALOS/PALSAR** во внутренний
формат пакета **PHOTOMOD Radar**
проходит **некорректно** – возникла
сдвиг изображений на величину

Мы располагали **4** изображениями по территории тестового полигона Тверской в Тверской области. Даты съемки:

24.12.2006

08.02.2007

27.12.2007

11.02.2008

С помощью этих изображений были сформированы **6** интерферометрических пар изображений (все возможные пары). К работе успешно была выполнена операция усреднения (**Multilooking**) с коэффициентами по дальности и азимуту, равными, соответственно, **2** и **5**.

№. п / п	Интерферометрические пары изображений	Временной интервал между съемками,	Средние значения когерентности	
			PHOTOMOD Radar	SARscape
1	24.12.2006 - 08.02.2007	46	0,396	0,242
2	24.12.2006 - 27.12.2007	368	0,362	0,132
3	24.12.2006 - 11.02.2008	414	-	0,059
4	08.02.2007 - 27.12.2007	322	0,359	0,132
5	08.02.2007 - 11.02.2008	368	0,358	0,080
6	27.12.2007 - 11.02.2008	46	0,386	0,248

Когерентность максимальна для интерферометрических пар **1** и **6**, когда временной интервал между съемками минимален и равен **46** суткам.

В случае **PHOTOMOD Radar** - с ростом временного интервала наблюдается падение - не более **10%**.

В случае **SARscape** все значения ниже, чем в случае **PHOTOMOD Radar**; при минимальном временном интервале в **46** суток различие в **1,5** раза;

с ростом временного интервала различие возрастает вплоть до **4,5** (интерферометрическая пара **5**).

3. РЕЗЮМЕ

1. Результаты совмещения в автоматическом режиме показали, что средние значения когерентности, полученные с использованием программного пакета **PHOTOMOD Radar**, выше аналогичных значений, полученных с использованием программного пакета **SARscape** – как в случае данных РСА **COSMO-SkyMed**, так и данных РСА **ALOS/PALSAR**.

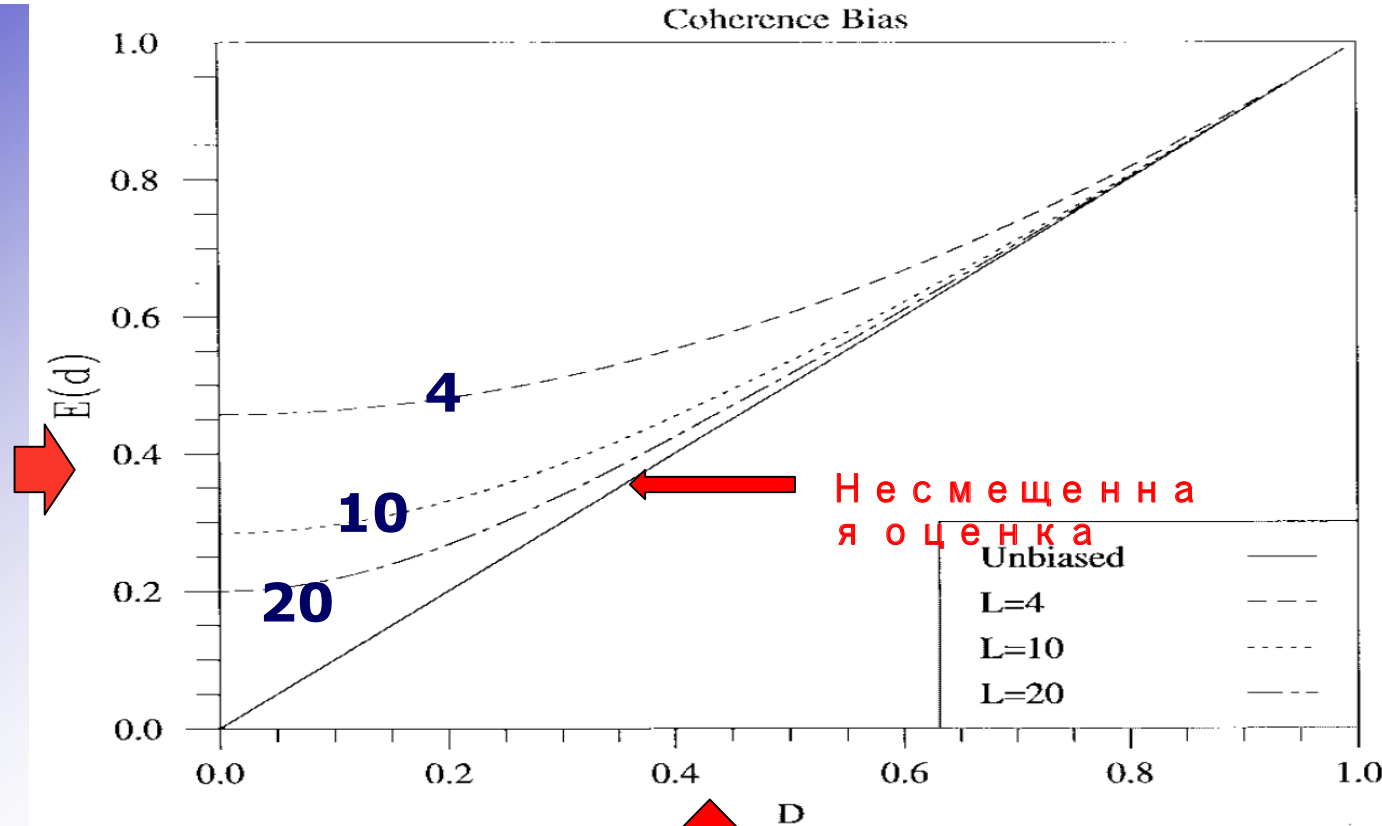
2. Однако точностные характеристики некоторых случаев многократно, **конечных результатов** интерферометрической обработки, ЦММ, построенных по данным РСА **COSMO-SkyMed** оказались несколько выше у программного пакета **SARscape**. Мы имеели уникальную возможность обсудить эти результаты с разработчиками пакета **SARscape Paolo Pasquali** и **Alessio Cantone**. Они провели предварительный анализ и пришли к выводу, что различия в оценках значений когерентности могут быть связаны с тем, что процедура расчета когерентности в

4. ИНТЕРПРЕТАЦИЯ ПОЛУЧЕННЫХ РЕЗУЛЬТАТОВ

По мнению разработчиков пакета **SARscape** корректную интерпретацию следует проводить с учетом выводов, сделанных ранее в **[Touzi and Vashon, 1999]**.

В данной работе были выполнены модельные расчеты значений когерентности для двух случайных комплексных гауссовских процессов. С помощью этих расчетов была смоделирована реальная ситуация, возникающая при расчетах значений когерентности для реальных данных. Было показано, что проведение расчетов значений когерентности для реальных данных с использованием выборки ограниченного объема приводит к завышению получаемой оценки для когерентности, причем этот эффект усиливается при низких значениях когерентности.

Математические
ожида-
ния
для
выбороч-
ных
значений
когерент-
ности,
полученных

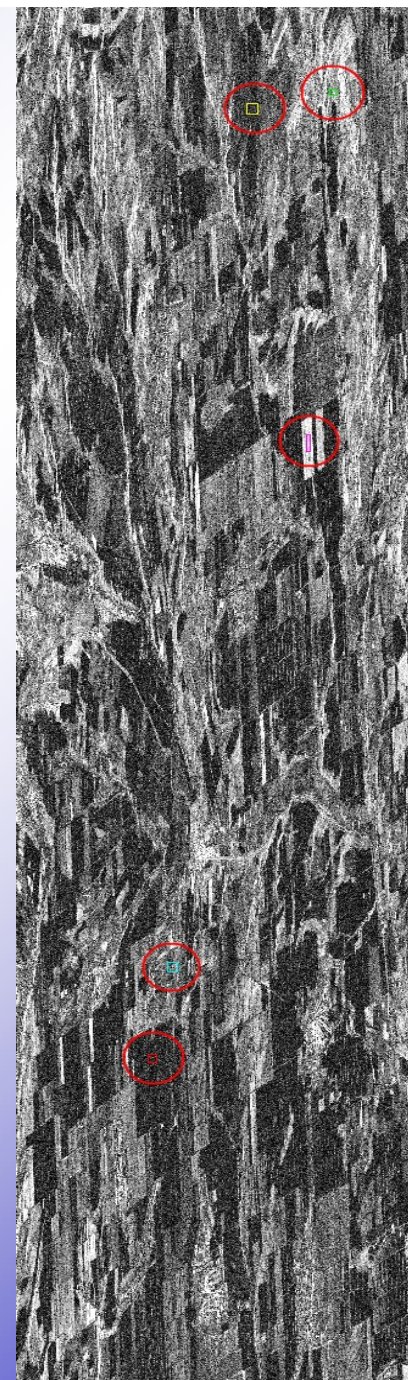


помощью
выборки
объемом 4,
10, 20
основные
элементы
составля-
ют
когерентности
но истинными;

Истинное значение
когерентности – по выборке
большого объема.

выборочные значения
когерентности завышены по сравнению
с истинными;
чем меньше истинное значение
когерентности, тем сильнее это
завышение;

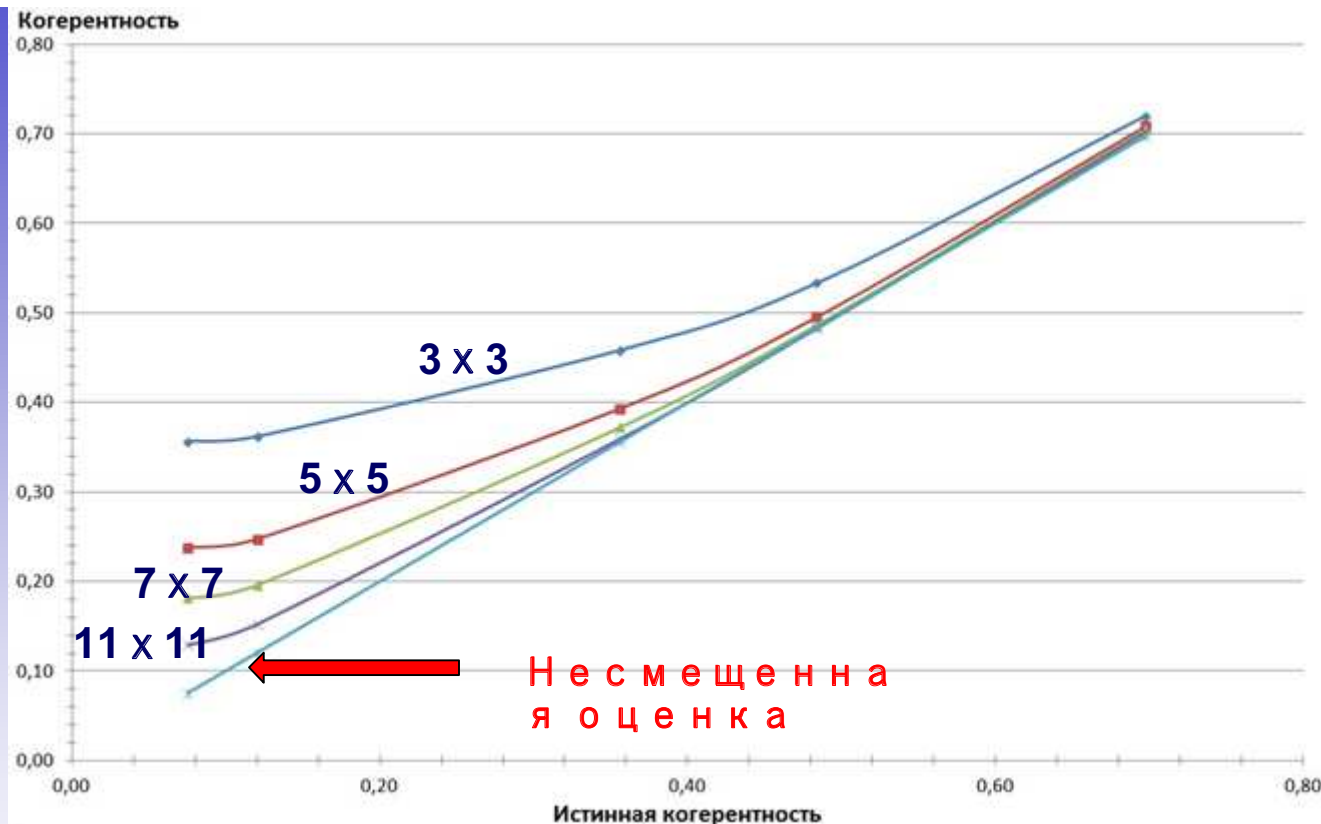
Для проверки применимости результатов модельных расчетов к данным реальных РСА нами был проведен специальный эксперимент с использованием интерферометрической пары изображений РСА **ALOS/PALSAR** (от **21.06.2009** и **06.08.2009**) по территории **Ставропольского края**. Справа – массив рассчитанных для каждой точки изображений значений когерентности. Усреднение **(Multilooking)** не проводилось. Расчеты когерентности на данном этапе выполнены с окном **3x3** - объем выборки равен **9**. Расчеты проводились с помощью пакета **SARscape** сельскохозяйственными полями было выбрано **5** достаточно однородных фрагментов с линейными размерами порядка **100x100** пикселей с отличающимися средними значениями когерентности (выделены



Далее были повторно проведены **расчеты когерентности**, но уже со **значительно большими окнами** (т.е. с **большими объемами выборки**), а именно:

- **5x5**, объем выборки **25** элементов;
- **7x7**, объем выборки **49** элементов;
- **11x11**, объем выборки **121** элемент;
- **21x21**, объем выборки **441** элемент.

Использовался пакет **SARscape**, поскольку в российском пакете **PHOTOMOD Radar** возможность **изменения размера окна не предусмотрена**, значения **когерентности**, рассчитанные с помощью каждого из **5 окон (3x3, 5x5, 7x7, 11x11, 21x21)** были **усреднены** по площади каждого из **5 квазиоднородных фрагментов** (тем самым были получены как бы математические **ожидания** для **результатов** **сравнения** **связанных** **на среднемощности** **графике**).



В качестве истинных значений когерентности по оси абсцисс откладывались усредненные по площади фрагментов значения, полученные с помощью самого большого окна **21x21**;

Результаты, полученные с помощью каждого из оставшихся **4** окон (**3x3**, **5x5**, **7x7**, **11x11**) - сформировали **четыре** графика.

Не трудно видеть, что полученные графики передают все основные свойства модельных графиков: (1) **выборочные значения когерентности завышены** по сравнению с истинными; (2) **завышение возрастает** при **низких значениях когерентности**; (3) с **увеличением объема выборки** **завышение**

Возможные отклонения могут быть объяснены: (1) недостаточной однородностью выбранных фрагментов; (2) в качестве истинных значений брались значения, полученные с помощью относительно большого, но не бесконечного, окна 21×21 и (3) у реальных данных – не гауссов. Координатный ряд в явном виде не учитывается.

Далее представлены усредненные по всей площади изображений значения когерентности, рассчитанные с помощью пакетов **PHOTOMOD Radar** и **SARscape** для одной и той же интерферометрической пары изображений РСА **ALOS/PALSAR** по Амурской области; размер окна при расчете когерентности – 3×3 пикселя. Расчеты были выполнены дважды: сначала по исходным изображениям, а

	Multilooking 1x1	Multilooking 5x4
PHOTOMOD Radar	0,477996	0,477994
SARscape	0,479293	0,250227

М о г у т б ы т ь с д е л а н ы с л е д у ю щ и е в ы в о д ы :

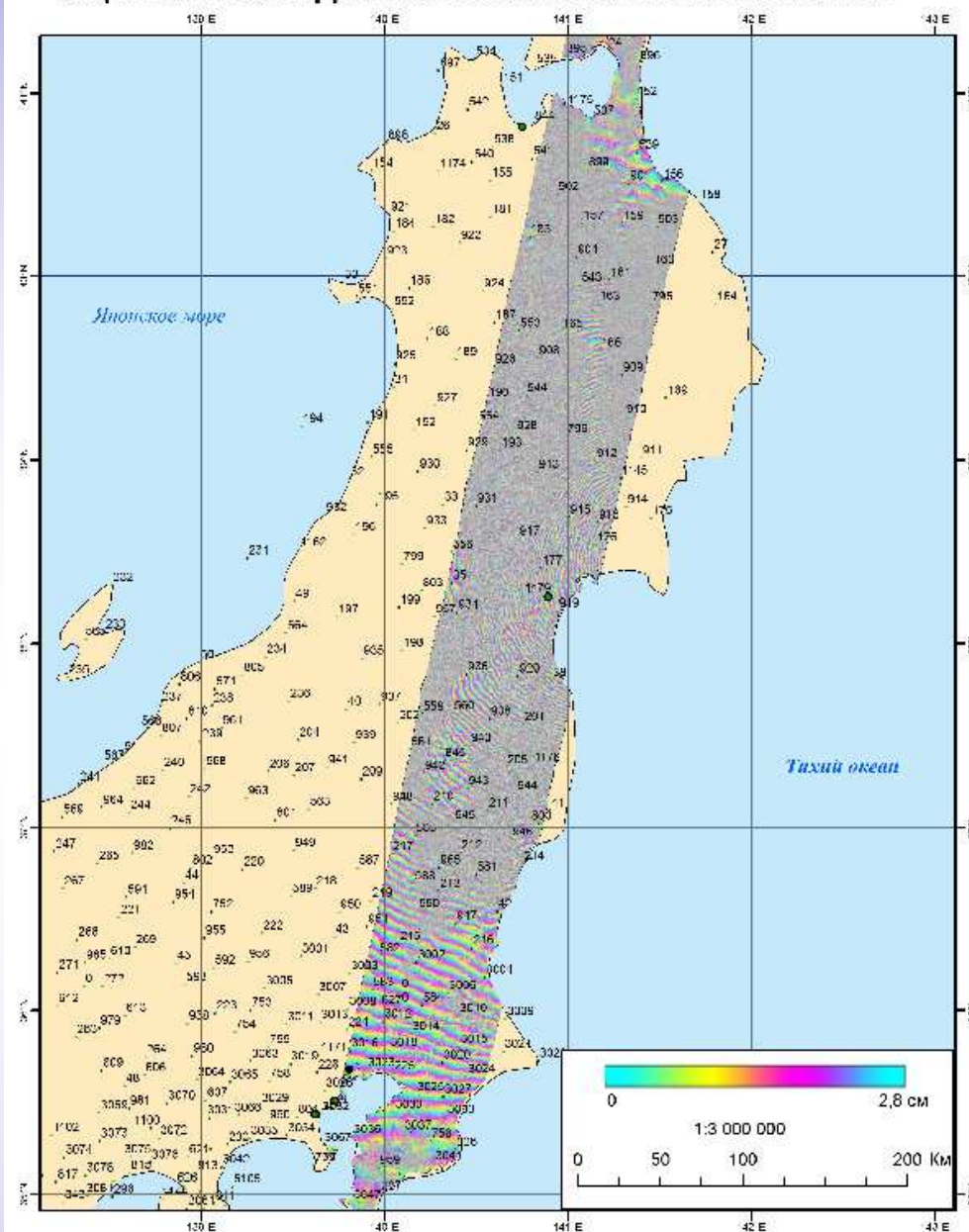
- **С о в п а д е н и е** с т о ч н о с т ь ю д о т р е т ь е г о з н а к а с р е д н и х з н а ч е н и й к о г е р е н т н о с т и , р а с с ч и т а н н ы х д л я **и с х о д н ы х** **и з о б р а ж е н и й (Multilooking 1x1)** **о б о и м и п а к е т а м и** о з н а ч а е т , ч т о т о ч н о с т и с о в м е щ е н и я д о с т а т о ч н о **б л и з к и** , а **а л г о р и т м ы** р а с ч е т а к о г е р е н т н о с т и д е й с т в и т е л ь н о **с о в п а д а ю т** ;
- **С о в п а д е н и е** с т о ч н о с т ь ю д о **ш е с т о г о з н а к а** с р е д н и х з н а ч е н и й к о г е р е н т н о с т и , р а с с ч и т а н н ы х с п о м о щ ь ю п а к е т а **Photomod Radar** д л я **и с х о д н о г о** **ф о р м а т а** **и з о б р а ж е н и й (Multilooking 1x1)** и **ф о р м а т а** с **у с р е д н е н и е м (Multilooking 5x4)** с в и д е т е л ь с т в у е т о т о м , ч т о , к о г е р е н т н о с т ь д л я **ф о р м а т а** с **у с р е д н е н и е м** в **э т о м** **п а к е т е** **п о л у ч а е т с я** **п р о с т о** **п у т е м** **с о о т в е т с т в у ю щ е г о у с р е д н е н и я** (**п о** **о к н у 5x4**) **т е х** **з н а ч е н и й** **к о г е р е н т н о с т и** , **к о т о р ы е** **б ы л и** **р а с с ч и т а н н ы х** **д л я** **и с х о д н ы х** **и з о б р а ж е н и й** ; **в** **р е з у л ь т а т е** **п о л у ч а е м ы е** **з н а ч е н и я** **к о г е р е н т н о с т и** **п р а к т и ч е с к и** **н е** **з а в и с и т** **о т** **п а р а м е т р о в** **у с р е д н е н и я** ;
- **Н а к о н е ц** , **з н а ч и т е л ь н о е** **п а д е н и е** **с р е д н** **26**

5. ЗАКЛЮЧЕНИЕ

- Итак, более **высокие** значения **когерентности**, получаемые с помощью пакета **PHOTOMOD Radar** отнюдь **не** свидетельствуют о более **высокой** точности **совмещения** изображений.
- В целом же накопленный в НЦ ОМЗ опыт интерферометрической обработки данных показал, что на сегодняшний день **российский** пакет **PHOTOMOD Radar** **уступает** по многим показателям и необходима его **срочная** модернизация.

- В настоящее время начинается аналогичный цикл обработки в рамках уже дифференциальной интерферометрической обработки с построением карт смещений (ЦКС). Планируется начать с зоны Японского землетрясения прошлого года, поскольку для этой территории доступны не только данные РСА, но и прецизионные результаты подспутниковых

ОЦЕНКА ПОСЛЕДСТВИЙ ЗЕМЛЕТРЯСЕНИЙ. ЯПОНИЯ



Интерферограмма, отражающая динамику изменений, произошедших в результате землетрясения, построена по данным радара с синтезированной апертурой антенны ASAR/Envisat от 19.02.2011 и 20.04.2011. Один интерферометрический цикл соответствует смещению на 2,8 см.



Научный центр оперативного
мониторинга Земли

ОАО "Российские
космические системы"



**Благодарю за
внимание!**

Thanks for your kind attention!

**127490, г. Москва, ул.
Декабристов, вл. 51,
стр. 25**

E-mail: alexey.a.feoktistov@ntsomz.ru,

Т е л . 8 499 758 07 48

*IV Всероссийская научно-техническая
конференция*

"Актуальные проблемы