

# ОБЗОР СОВРЕМЕННЫХ РАДИОЛОКАЦИОННЫХ ДАННЫХ ДЗЗ И МЕТОДИК ИХ ОБРАБОТКИ, РЕАЛИЗОВАННЫХ В ПРОГРАММНОМ КОМПЛЕКСЕ SARSCAPE

Ю.И. Кантемиров (ООО «Компания Совзонд»)

## Обзор радиолокационных данных ДЗЗ

Радиолокационная космическая съёмка в настоящее время выполняется в ультракоротковолновой (сверхвысокочастотной) области радиоволн, подразделяемой на X-, C-, и L-диапазоны (табл. 1). В ближайшие годы также планируется запуск первого космического радиолокатора Р-диапазона (BIOMASS, Европейское космическое агентство).

Таблица 1. Диапазоны радиоволновой области электромагнитного спектра, в которых выполняется (или выполнялась) космическая съёмка.

Диапазон	Частоты, ГГц	Длины волн, см	Спутниковые системы
X	5.20 – 10.90	2.75 – 5.77 (2.4 – 3.8)	USGS SLAR, TerraSAR-X/TanDEM-X, Cosmo-SkyMed 1-4
C	3.9 – 6.2	3.8 – 7.6	ERS-1,2; ENVISAT-ASAR; RADARSAT-1,2
L	0.39 – 1.55	19.3 – 76.9 (15 – 30)	SIR-A,B, JERS, ALOS PALSAR

Широкое применение спутниковых радиолокационных данных началось в 1991 году с запуском спутника ERS-1 (Европейское космическое агентство) с радиолокатором на борту. Первоначальная цель запуска этого первого гражданского спутникового радиолокатора среднего пространственного разрешения (20 м) определялась довольно узко и ограничивалась морскими приложениями (мониторинг ледовой обстановки, айсбергов, судоходства, течений, нефтяных пятен и т.д.). Однако, уже после прохождения спутником нескольких полных циклов повторения орбиты выяснилось, что кроме морских приложений у этого радиолокатора имеется большой потенциал и для выполнения различных задач на суше.

Во-первых, на опытных участках были успешно построены цифровые модели рельефа по результатам интерферометрической обработки пар радарных снимков, выполненных с временным интервалом, равным кратному числу полных циклов повторения орбиты. Однако, для большинства типов ландшафтов (кроме пустынь) когерентность (мера корреляции фаз радарных снимков) для построения ЦМР

оказывалась недостаточной, поскольку минимально возможный период между интерферометрическими съемками составлял один полный цикл повторения орбиты, то есть 35 дней во время основной фазы эксплуатации «С», и 3 дня во время фаз эксплуатации «А», «В» и «D».

В том числе поэтому, в пару к ERS-1 был запланирован запуск спутника ERS-2, а вместе они должны были составить тандемную пару спутников, способных выполнять тандемную интерферометрическую съемку одной и той же территории с временным интервалом в 1 сутки. В тандемном режиме пара этих спутников проработала около года (1995-1996 гг.). Затем, с выходом из строя определенного оборудования на спутнике ERS-1 тандемная миссия официально закончилась. Фактически же тандемные съемки продолжались до марта 2000 г., когда прекратилась эксплуатация ERS-1, хотя в интерферометрической обработке тандемных пар после 1996 года возникают некоторые дополнительные трудности. Всего тандемом ERS-1 – ERS-2 отснята большая часть земного шара, иногда по несколько раз.

Еще одним важным практическим применением спутниковых радиолокаторов стал мониторинг смещений земной поверхности по результатам дифференциальной интерферометрической обработки. Если учесть, что спутник ERS-1 выполнял съемку с 1991 года, а спутник ERS-2 находился на орбите до середины 2011 года, а также то, что эти два спутника находились на примерно одной и той же орбите и производили радарную съемку одинаковым сенсором SAR, то на значительную часть земного шара имеются многопроходные интерферометрические цепочки снимков за период с 1991 по 2011 годы. Так, например, многие европейские города снимались каждый месяц с 1995 года (а с 1991 по 5-10 раз в год). То есть, в настоящее время имеются 100- или 200-проходные цепочки радарных снимков, которые, в случае достаточной когерентности (например, в случае застроенных территорий), могут быть обработаны всеми возможными дифференциальными интерферометрическими методиками, описанными ниже, с получением на выходе карт смещений и деформаций земной поверхности и сооружений за период до 20 лет. На территорию России и стран СНГ нередко имеются 30-40 проходные, и практически всегда 15-20 проходные цепочки таких снимков.

В 2002 году Европейским космическим агентством был запущен спутник ENVISAT, с радиолокатором ASAR на борту, который представлял собой следующее поколение спутников ERS-1 и 2. Этот спутник характеризуется большим количеством углов и режимов съемки, возможностью съемки в разных поляризациях (в т.ч., в двух одновременно) и в широкополосном режиме. При этом снимки, сделанные в режиме

Image Mode в полосе съемки IS2 и с поляризацией VV интерферометрически совместимы со снимками ERS-1 и ERS-2. Эта особенность позволила в течение нескольких временных периодов организовать тандемную съемку ERS-2 – ENVISAT с временным интервалом в 30 минут на больших базовых линиях. Съемка в таком режиме характеризуется крайне высоким фазовым разрешением интерферограмм по высоте и при этом довольно высокой когерентностью фаз этих снимков, что позволяет строить ЦМР высокой точности (но среднего пространственного разрешения 20 м).

Кроме того, спутник ENVISAT также вел многопроходную интерферометрическую съемку значительных территорий, в том числе, России и стран СНГ, что позволяет выстраивать 20 – 40 проходные интерферометрические цепочки снимков для мониторинга смещений и деформаций земной поверхности и сооружений.

Компания MDA (Канада) в 1995 году запустила радиолокационный спутник Radarsat-1 несколько иной концепции. Спутник мог вести съемку с пространственным разрешением от 100 до 7 м, под многими углами съемки и с разными площадями кадра. Наличие большого количества режимов съемки позволяло выполнять мониторинговые задачи, поскольку одна и та же территория могла сниматься не только через полный цикл орбиты (как в случае ERS-1 и ERS-2), но и через каждые 2-3 дня (но под разными углами съемки). Другим принципиальным отличием от спутников Европейского космического агентства являлась ориентация на съемку на заказ (в отличие от ERS и ENVISAT, ведущих более или менее регулярную съемку всего земного шара). Поэтому для Radarsat-1 архивные снимки как правило есть только на те территории, где выполнялась съемка на заказ.

Логическим продолжением спутника Radarsat-1 стал запущенный в 2007 году спутник Radarsat-2 (MDA, Канада). Этот спутник характеризуется пространственным разрешением от 100 м до 1 м, возможностью съемки во всех возможных поляризационных режимах, широким диапазоном площадей кадров и очень высокой производительностью, а также возможностью мониторинговой съемки через 2-3 дня. Главным преимуществом этого радарного спутника является наилучшее среди всех радарных спутников соотношение «пространственное разрешение – площадь сцены» (по состоянию на начало 2012 года). Так, в режиме съемки Wide Fine пространственное разрешение составляет 7 м при размере сцены 150 x 170 км с возможностью съемки в двух поляризациях одновременно; в режиме Wide Ultrafine – разрешение 3 м при размере сцены 50 x 50 км, в режиме Spotlight A – разрешение 1 м при размере сцены 18 x 8 км.

Спутники сверхвысокого пространственного разрешения TerraSAR-X и TanDEM-X (Infoterra GmbH, Германия) также предлагают все возможные режимы съемки и комбинации поляризаций сигнала, а также большой диапазон площадей кадров и углов съемки. Среди важных особенностей этого спутника следует отметить крайне высокую точность определения орбиты, а следовательно и крайне низкую (субпиксельную) ошибку геолокации снимков (естественно, это соблюдается только при использовании ЦМР в процессе геокодирования). Для мониторинга смещений земной поверхности и деформаций сооружений данные TerraSAR-X могут быть использованы только в условиях пустынь, степей и застроенных территорий, поскольку при съемке в X-диапазоне с периодом 11 дней и более даже незначительная растительность резко ухудшает когерентность даже между соседними по времени съемками (полный цикл орбиты – 11 дней, а интерферометрическая обработка возможна для снимков, сделанных через целое число полных циклов орбиты). С запуском спутника Tandem-X в пару к спутнику TerraSAR-X для выполнения одновременной тандемной интерферометрической съемки начался проект по построению беспрецедентной по точности и пространственному разрешению глобальной ЦМР, который должен завершиться к 2015 году.

Радиолокатор PALSAR, расположенный на спутнике ALOS, в период с 2006 по начало 2011 года являлся единственным спутниковым радиолокатором L-диапазона. Он выполнял съемку всей поверхности Земли ежегодно по нескольку раз, поэтому на любую точку на Земле, скорее всего, найдется архив в 10 – 20 интерферометрических проходов. Данные ALOS PALSAR пригодны для построения цифровых моделей рельефа и мониторинга смещений интерферометрическим методом, для мониторинговых задач лесного и сельского хозяйства (по архивным данным) и т.д. L-диапазон позволяет дольше сохранять когерентность, и, в некоторой степени, компенсировать ее падение, вызванное влиянием растительности. Плотный лес и джунгли, все же являются ограничением для интерферометрии, даже в L-диапазоне. Значительным недостатком ALOS PALSAR являлось отсутствие возможности съемки на заказ.

Одной из наиболее многофункциональных и интересных на сегодняшний день, по мнению автора, группировкой радарных спутников является группировка из 4 спутников COSMO-SkyMed 1-4 (E-GEOS, Италия). Среди основных особенностей этой группировки можно отметить частоту интерферометрических съемок до 8 раз в месяц, наличие различных поляризационных режимов, пространственное разрешение до 1 м. Высокая частота интерферометрических съемок, в частности, позволяет генерировать высококачественные когерентные мультитременные композиты высокого разрешения,

находящие широкое применение в сельском и лесном хозяйстве, а также при мониторинге землепользования. Немаловажным фактором является также очень привлекательная ценовая политика, особенно, на данные высокого разрешения (3 м и 1 м) при заказе многопроходных новых съемок (от 15 проходов над одной и той же территорией и больше).

Важной тенденцией в развитии спутниковых радиолокационных систем (помимо повышения пространственного разрешения и увеличения числа режимов съемки) является расширение поляризионных возможностей, и, в особенности, появление возможности одновременной съемки в четырех возможных поляризациях (такая съемка позволяет в дальнейшем генерировать так называемую полную поляризионную матрицу). Многополяризионные режимы съемки, в частности, открывают новые возможности для использования радарных съемок в задачах лесного и сельского хозяйства.

Планируемые к запуску радарные спутники приведены в таблице 2.

*Таблица 2. Планируемые к запуску радарные спутники*

<b>Название спутников</b>	<b>Оператор</b>	<b>Диапазон длин волн</b>	<b>Планируемые годы запуска</b>	<b>Пространственное разрешение</b>
RISAT-1	ISA (Индия)	C	2012	3 – 15 м
Sentinel-1 A/B	ESA (Европа)	C	2013 – 2015	5 – 20 м
SAOCOM-1 A/B	CONAE (Аргентина) ASI (Италия)	L	2013 – 2015	5 м
ALOS-2	JAXA (Япония)	L	2012 – 2013	3 – 15 м
COSMO-SkyMed-5/6/7/8	ASI (Италия)	X	2013 – 2015	1 – 15 м
Radarsat constellation mission (RCM)	CSA, MDA (Канада)	C	2014 - 2015	1 – 100 м
BIOMASS	ESA (Европа)	P	2015 - 2017	50 м

Компания «Совзонд» поставляет данные со всех вышеперечисленных радиолокационных спутников, а также предоставляет программное обеспечение для обработки радарных данных “SARscape” (SARMAP, Швейцария) и оказывает услуги по тематической обработке данных радарных съемок, а также по обучению работе в “SARscape”. В следующей статье приводятся основные методики обработки данных радиолокационных съемок, их реализация в программном комплексе “SARscape” и примеры практического применения этих методик.

## **Общие сведения о программном комплексе SARscape**

Программный комплекс “SARscape” (разработчик – SARMAP, Швейцария; правообладатель – Exelis VIS, США) представляет собой набор дополнительных модулей к программе ENVI (Exelis VIS, США). Эти дополнительные модули позволяют выполнять предварительную и тематическую обработку радиолокационных снимков. Краткая спецификация модулей приводится ниже:

### **Модуль SARscape Basic**

Модуль включает следующие возможности обработки данных: фокусировка, импорт комплексных и амплитудных данных, корегистрация, фильтрация (удаление спекл-шумов), извлечение характеристик (включая когерентность), геокодирование, радиометрическую калибровку и нормализацию радарных снимков, составление из них бесшовных мозаик, сегментацию изображений. Эти функции дополнены набором инструментов, включающим широкий диапазон возможностей: от визуализации изображения до импорта, загрузки из интернета, интерполяции ЦМР, картографических и геодезических преобразований, коррекции орбит радарных спутников, преобразований растровых файлов и т.д.

### **SARscape Focusing**

Модуль расширяет возможности фокусировки «сырых» радиолокационных голограмм нулевого уровня в SARscape для данных ERS-1 и 2, ENVISAT-ASAR, JERS и ALOS PALSAR. Данный модуль может быть полезен тем, кто собирается выполнять интерферометрическую обработку данных ALOS PALSAR (поскольку в SARscape фокусировка этих данных осуществляется с приведением их к нулевой доплеровской частоте, что значительно упрощает корегистрацию и интерферометрическую обработку, а Японское космическое агентство JAXA фокусирует эти данные, не приводя их к нулевой доплеровской частоте). Также данный модуль пригодится тем, кто обрабатывает многопроходные интерферометрические цепочки снимков ERS и ENVISAT (данные с этих спутников загружались и загружаются на разные приемные станции с различными процессорами фокусировки, и если приобрести сфокусированные комплексные данные – за счет этого можно внести дополнительные помехи в интерферометрическую фазу; в модуле SARscape Focusing возможно выполнить фокусировку всей цепочки в одном и том же процессоре).

### **SARscape Gamma-Gaussian Filter**

Модуль расширяет возможности SARscape Basic по фильтрации амплитуд радарных снимков и включает целое семейство специфических радиолокационных фильтров.

Алгоритмы фильтрации, разработанные PRIVATEERS N.V., основаны на Гамма/Гауссовом распределении спекл-шума по сцене. Они особенно эффективны для уменьшения спекл-шумов, т. к. сохраняют отражающие характеристики радиосигнала, структурные свойства и пространственное разрешение, особенно в сильно текстурированных радиолокационных изображениях и в присутствии антропогенных объектов.

### **SARscape Interferometry**

Модуль предназначен для обработки интерферометрических радиолокационных данных (интерферометрия с двух, трех или четырех последовательных витков, InSAR/DinSAR) для задач создания ЦМР, получения последовательности изображений, совмещенных друг с другом с субпиксельной точностью, а также для построения карт смещений/деформаций земной поверхности. Основная идея метода заключается в корегистрации радарных изображений, формировании из их фазовых слоев интерферограмм, которые представляет собой результат комплексного поэлементного перемножения фазовой информации радарных изображений местности, полученных идентичными съемочными SAR-системами из близко расположенных точек орбиты, одной и той же территории. Затем интерферометрическая фаза может быть преобразована в абсолютные высоты либо в изменения высот за период между радарными съемками. Кроме того, в модуль дополнительно включены несколько специфических инструментов, например, функция отслеживания метровых подвижек ледовых массивов по амплитуде радарных снимков. Также в модуле представлена функция атмосферной коррекции интерферограмм по данным синхронных с радарными оптических съемок (на данный момент, в модуле поддерживаются данные ENVISAT ASAR (радар) и ENVISAT MERIS (оптика)).

### **SARscape ScanSAR Interferometry**

Модуль расширяет возможности модуля SARscape Interferometry, позволяя выполнять интерферометрическую обработку данных ENVISAT ASAR в широкополосном режиме съемки Wide Swath, обеспечивая возможность получения интерферограмм низкого разрешения (75 м) на большие территории (400 x 400 км), с возможностью последующей атмосферной коррекции этих интерферограмм средствами модуля SARscape Interferometry.

### **Polarimetry/Polarimetric Interferometry**

Модуль позволяет проводить обработку поляриметрических SAR данных (таких как ALOS PALSAR PLR и RADARSAT-2 Quadpol): калибровку данных, синтезирование изображений, расчет различных параметров радарных данных (энтропия, анизотропия, альфа), расчет поляриметрических интерферограмм и когерентностей (PolInSAR).

Поляриметрические данные являются ценным источником информации о подстилающей поверхности и используются в основном для классификации объектов в задачах лесного и сельского хозяйства, при мониторинге судоходства, ледовой обстановки, нефтеразливов и т.д.

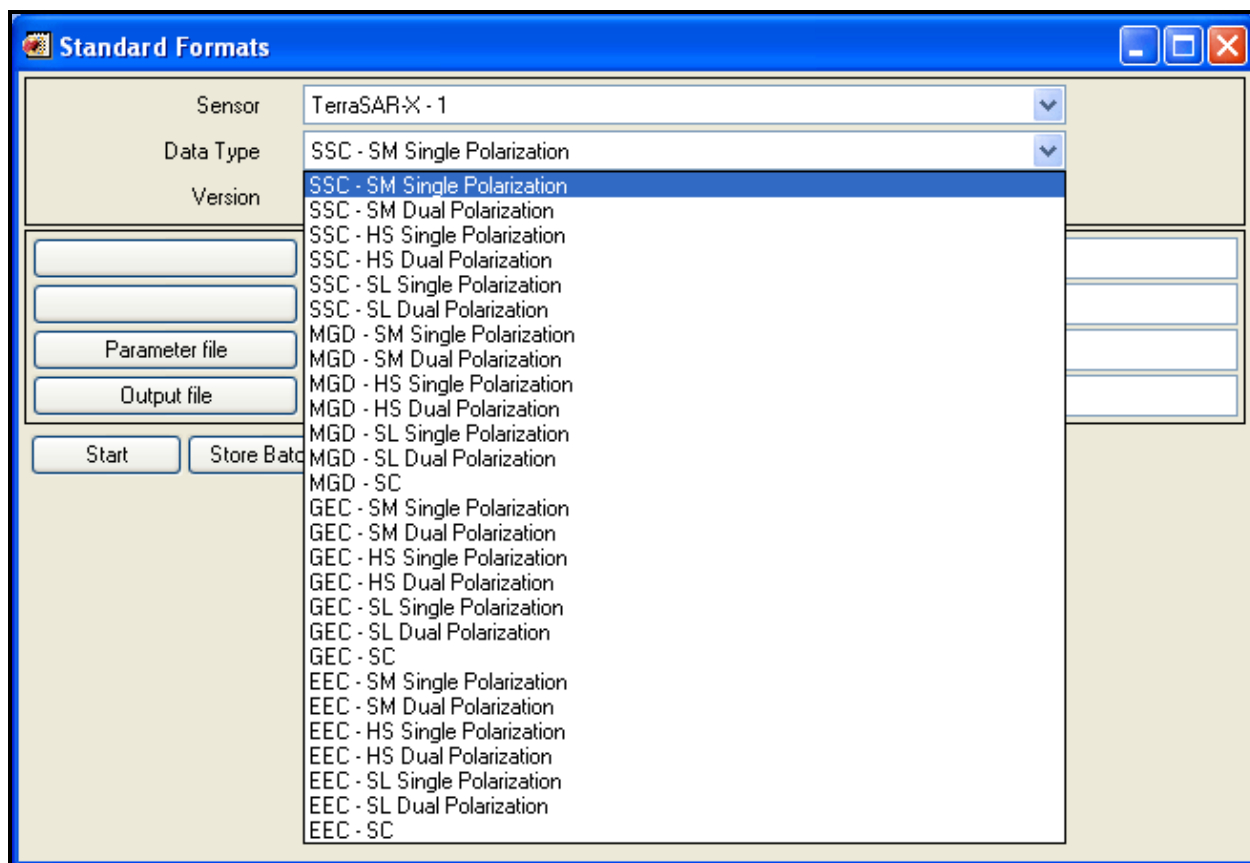
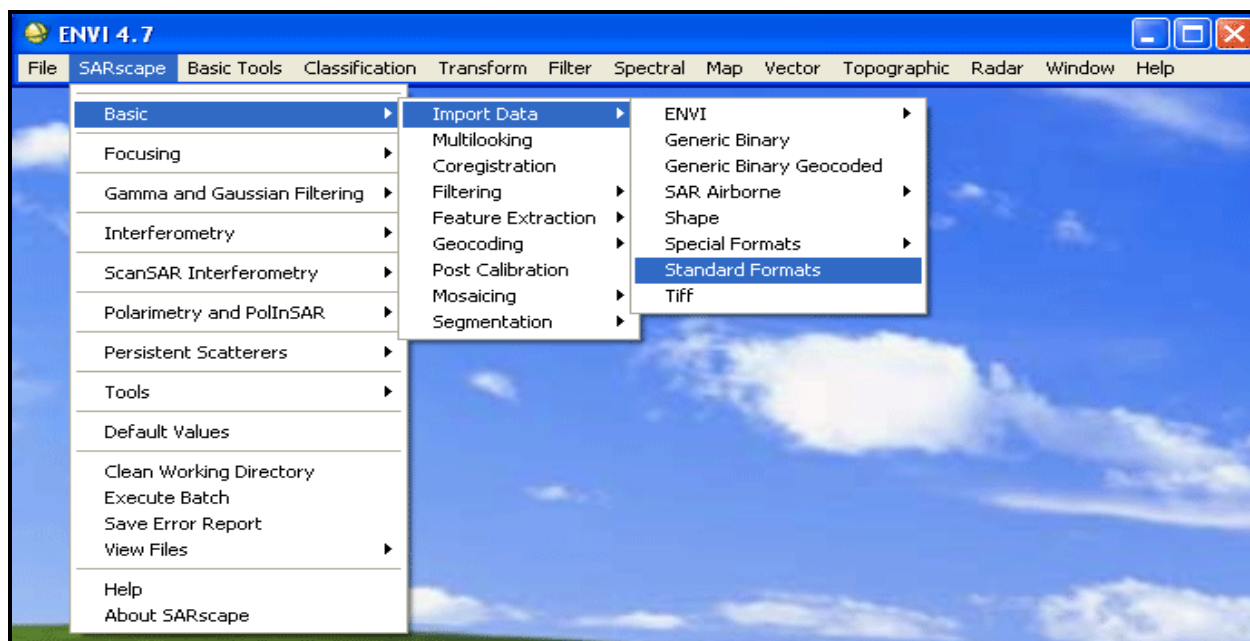
### **Interferogramm Stacking**

В модуле реализованы два метода исследования (PS и Sbas), обладающие уникальной способностью по измерению смещений и деформаций земной поверхности и сооружений с миллиметровой точностью. В основе методов лежит совместная обработка снимков многопроходных интерферометрических цепочек (в случае PS – обработка устойчиво отражающих радиолокационный сигнал точечных целей, в случае Sbas – распределенных целей). В случае PS – все имеющиеся снимки трансформируются в геометрию одного основного снимка, а затем каждое изображение обрабатывается с целью локализации постоянных рассеивателей (таких как здания, мосты, скальные породы и т.д.), отображающихся на радиолокационных изображениях в виде интенсивно и стабильно отражающих точек. Точное измерение миллиметровых подвижек выполняется именно по таким объектам. Результат представляет собой массив точек, в атрибутах каждой из которых – смещения на каждую дату съемки в миллиметрах, среднегодовая скорость смещений и абсолютная высота. В случае Sbas – производится обработка очень большого количества перекрестных во времени интерферограмм с последующим восстановлением последовательных во времени смещений. Такие результаты могут использоваться для различных строительных и инженерных проектов, при маркшейдерско-геодезическом мониторинге, геомеханическом моделировании, при мониторинге деформаций критически важных сооружений и т.д. Данный модуль на сегодняшний день является уникальным программным продуктом и не имеет аналогов.

### **Импорт данных**

Программный комплекс “SARscape” в настоящее время поддерживает импорт данных практически со всех радиолокационных спутников, включая все режимы съемки и все возможные форматы поставки. Интерфейс импорта спутниковых радарных данных приведен на рисунке 1.





*Рис. 1. Меню импорта спутниковых радиолокационных данных в SARscape.*

Помимо вышеприведенного стандартного меню импорта, в SARscape имеется возможность импорта и некоторых менее распространенных форматов. Так, для данных ERS-1, ERS-2, ENVISAT и ALOS имеется возможность как импорта из стандартных форматов, так и фокусировки голограмм нулевого уровня. Для первых трех спутников эта

возможность актуальна, поскольку нередко снимки, составляющие одну интерферометрическую щепочку, принимались и фокусировались на различные станции с различными процессорами фокусировки, что приводит к дополнительным проблемам при интерферометрической обработке. Если же сфокусировать все эти данные в одном процессоре фокусировки SARscape – то из интерферограмм будут изначально убраны соответствующие помехи. Что касается данных ALOS PALSAR, то стандартный формат SLC, поставляемый Японским аэрокосмическим агентством, представляет собой данные, не приведенные в процессе фокусировки к нулевой доплеровской частоте, в то время как процессор фокусировки SARscape – приводит эти данные к нулевой доплеровской частоте. Это позволяет избежать в интерферограммах фазовых помех, вызванных вращением Земли.

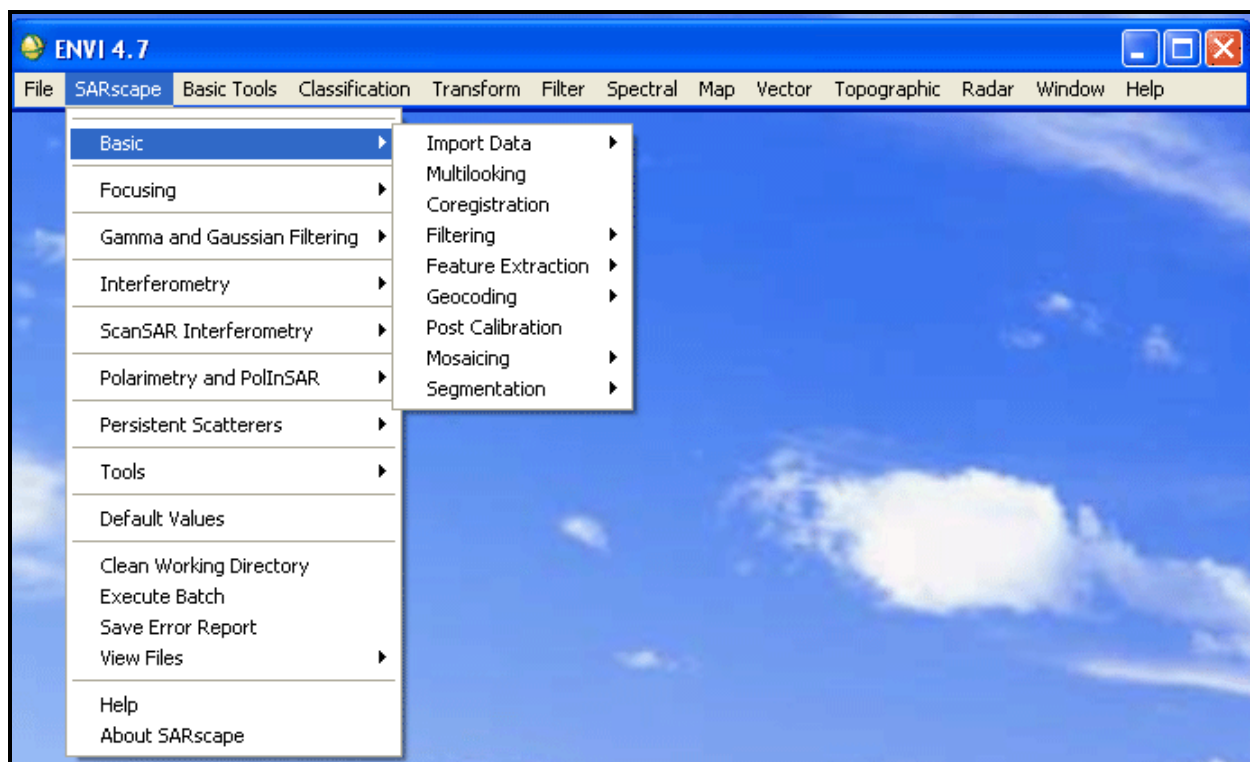
Кроме того, SARscape позволяет импортировать данные с некоторых авиационных радарных систем, таких как TELAER, OrbiSAR, E-SAR, RAMSES.

### **Базовые функции**

Меню базовых функций SARscape, приведенное на рисунке 2, позволяет выполнять некогерентное накопление комплексных данных с задаваемыми коэффициентами, геокодирование амплитудных данных, их фильтрацию (есть как базовый набор фильтров, так и дополнительный набор Гамма-Гауссианских фильтров), получение мозаик изображений, сегментацию, корегистрацию, вычисление файла средних значений произвольного параметра (например, средняя амплитуда по серии снимков), файла стандартных отклонений, файла максимальных и минимальных значений и т.д. К удобным особенностям базовых функций SARscape можно отнести возможность перевода геокодированных растровых и векторных файлов (или координат точек) в координаты ряд-колонка (азимут-наклонная дальность) конкретного снимка, что очень удобно при интерферометрической обработке.

### **Интерферометрия**

Возможности радиолокационной интерферометрии представлены в SARscape максимально широко и реализованы в четырех отдельных модулях. Рассмотрим их по порядку.

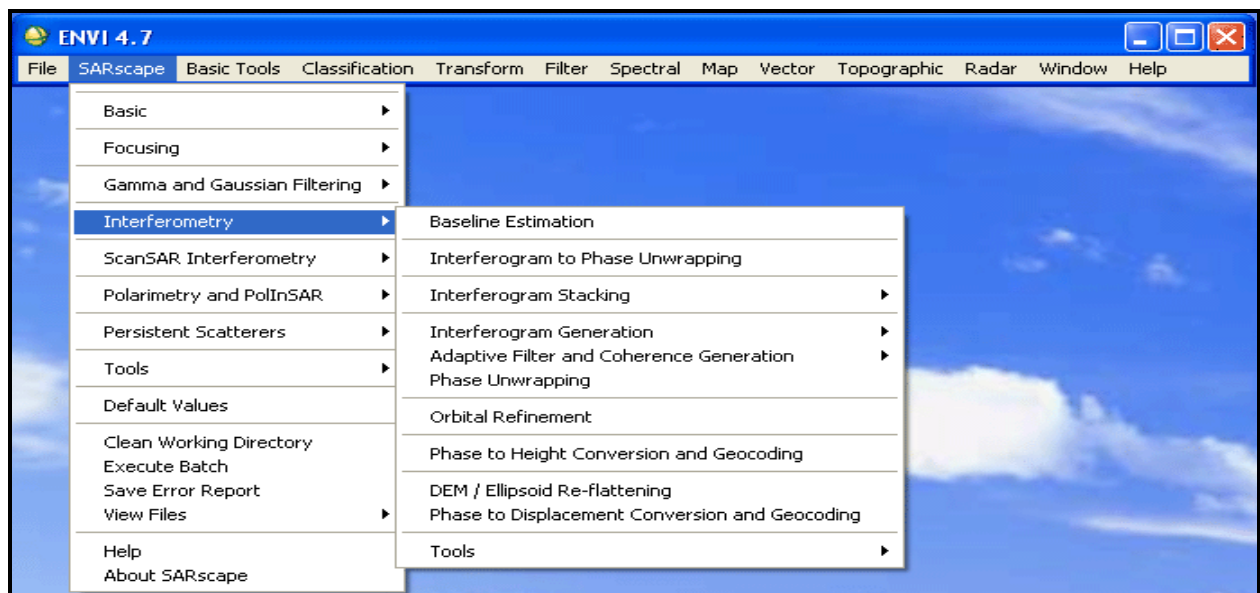


*Рис. 2. Меню базовых функций SARscape.*

Модуль “Interferometry”, меню которого представлено на рисунке 3, позволяет выполнять интерферометрическую обработку радарных данных с получением на выходе ЦМР либо карты смещений земной поверхности. Модуль позволяет выполнять:

- автоматическую трехэтапную корегистрацию радарных снимков с точностью до 1/10 пикселя (возможна обычная корегистрация и корегистрация с использованием опорной ЦМР);
- двухпроходную интерферометрию (на входе интерферометрическая пара радарных снимков; на выходе ЦМР);
- двухпроходную дифференциальную интерферометрию (на входе используется интерферометрическая пара радарных снимков и опорная ЦМР; на выходе – смещения, произошедшие за период между съемками первого и второго снимков пары);
- трехпроходную дифференциальную интерферометрию (по первому и второму снимкам трехпроходной интерферометрической цепочки строится интерферометрический рельеф, фаза которого затем вычитается из интерферограммы, построенной по первому и третьему снимкам цепочки; на выходе – смещения за период между первым и третьим снимками; смещениями между первым и вторым снимками пренебрегают);

- четырехпроходная дифференциальная интерферометрия (строятся интерферограммы по первому и второму, а также по третьему и четвертому снимкам четырехпроходной цепочки; затем оцениваются смещения для первой и второй пары и вычисляется средняя скорость смещений);
- компенсация набега фазы по высоте с использованием опорной ЦМР, модели эллипсоида или адаптивного алгоритма, основанного на вычислении средней по площади снимка частоты интерференционных циклов;
- фильтрация интерферограмм и расчет когерентности между фазами снимков интерферометрической пары тремя различными фильтрами на выбор (усредняющий, адаптивный и фильтр Голдстейна);
- развертка фазы двумя различными методами (метод растущей области и метод потока минимальной стоимости);
- коррекция орбиты по точкам с известной высотой, либо с использованием опорной ЦМР;
- возможность второй итерации компенсации набега фазы по высоте (может быть выполнена после коррекции орбиты);
- пересчет фазовых значений в высоты с получением на выходе ЦМР;
- пересчет фазовых значений в смещения и деформации, с получением на выходе карты смещений и деформаций;



**Рис. 3.** Меню модуля “Interferometry” SARscape.

Также отметим серию удобных для интерферометрической обработки инструментов, позволяющих, например, рассчитывать базовые линии для всех возможных парных комбинаций снимков цепочки; вырезать одну и ту же область, задаваемую на

одном из снимков цепочки (с выполнением корегистрации); редактировать развернутую фазу и удалять артефакты развертки; выполнять шивку ЦМР различного разрешения между собой с помощью вейвлет-алгоритмов и др.

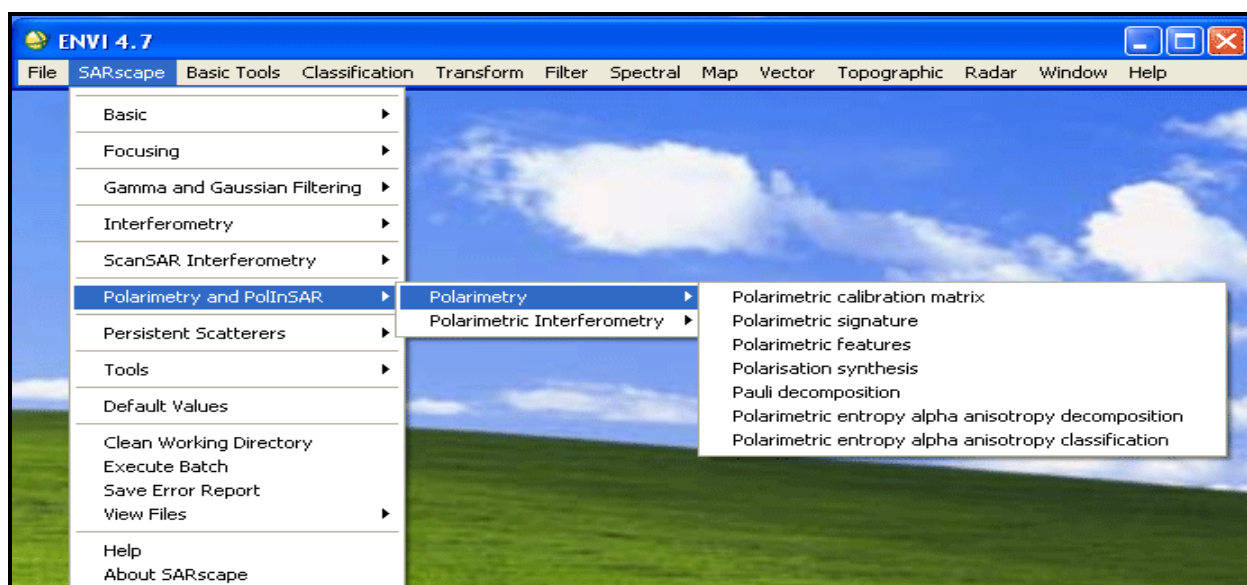
Дополнительные возможности представлены в модуле интерферометрии широкополосного режима. Этот модуль позволяет интерферометрически обрабатывать данные широкополосного режима съемки ENVISAT ASAR WideSwath. Выходным продуктом данного модуля является дифференциальная интерферограмма, рассчитанная по интерферометрической паре широкополосных снимков ENVISAT ASAR WideSwath. Далее, обработка этой интерферограммы может быть продолжена в модуле “Interferometry”. Преимущество интерферометрии широкополосного режима состоит в том, что можно рассчитывать интерферограммы по снимкам площадью 400x400 км с пространственным разрешением 75 м.

Еще один вариант интерферометрии представлен в модуле интерферометрии постоянных рассеивателей. Входными данными для этого модуля являются 20-40 проходные серии снимков. На выходе – не только карта смещений, но и графики развития смещений во времени для каждой точки этой карты (т.е. анализ динамики происходящих смещений). Для метода характерна повышенная чувствительность к малым смещениям, к выявлению трендов смещений. К преимуществам данного метода также можно отнести меньшую зависимость от величины базовой линии (смещения достоверно выявляются даже при больших базовых линиях) и отсутствие сложностей, связанных с разверткой фазы. К ограничениям метода можно отнести необходимость наличия значительного количества высококогерентных точек (не менее 100-200 на площадь 50x50 пикселей). Такая плотность постоянных отражателей достигается на застроенных территориях и на территориях без растительности. Метод более отлажен для данных С-диапазона, чем для данных L- и X-диапазонов.

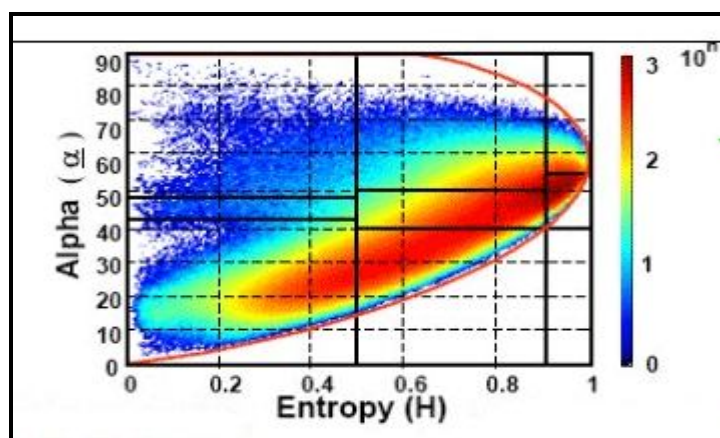
### **Поляриметрия и поляриметрическая интерферометрия**

Отдельно рассмотрим модуль поляриметрии и поляриметрической интерферометрии. Данный модуль специально предназначен для обработки радиолокационных снимков, сделанных в четырехполяризационном режиме, позволяющим генерировать полную поляризационную матрицу. Уникальная особенность полностью поляриметрических данных состоит в возможности классификации объектов на снимке по физическому типу отражения. Меню модуля “Polarimetry” представлено на

рисунке 4. Основной функцией этого модуля является “Polarimetric entropy alpha anisotropy classification”, которая и позволяет выполнять классификацию объектов на поверхности по типу отражения. Физический смысл такой классификации можно пояснить следующим образом: из четырехполяризационного радарного снимка генерируется полная поляризационная матрица (рисунок 5), и в зависимости от того в какую область этой матрицы попадает каждый конкретный пиксель радарного снимка – ему присваивается определенный класс. В SARscape в настоящее время реализован метод поляриметрической классификации, позволяющий выделять 9 классов объектов (рисунок 6). Есть и другие методы позволяющие выделять другое (большее или меньшее) число классов.

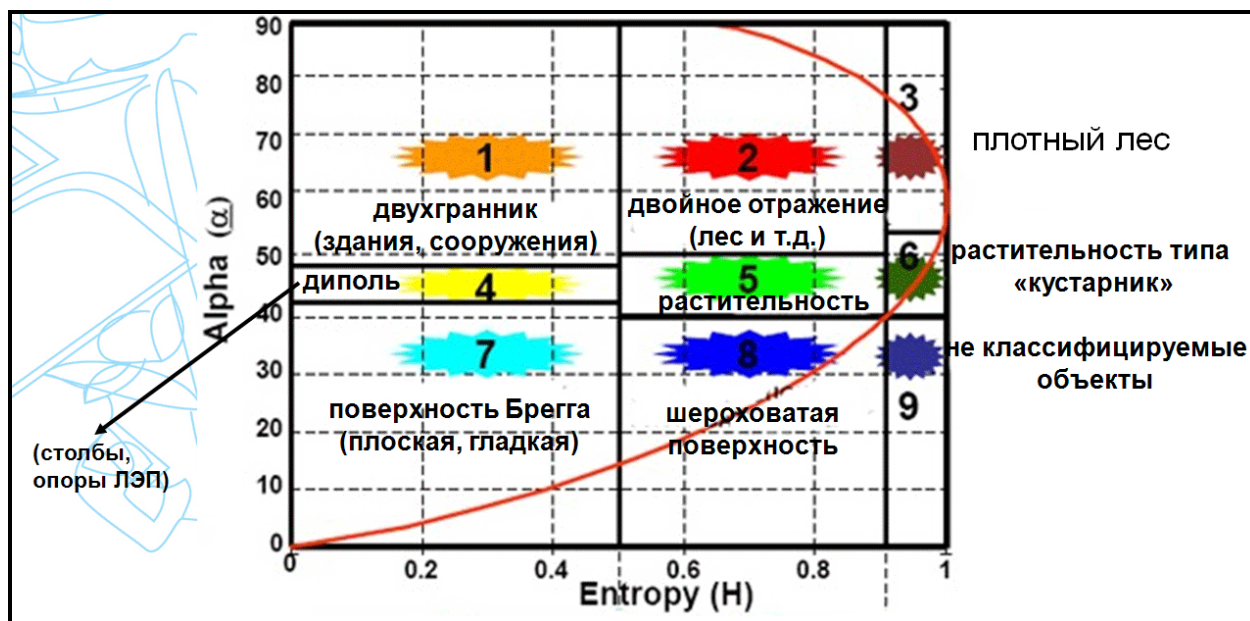


*Рис. 4. Меню модуля “Polarimetry” SARscape.*



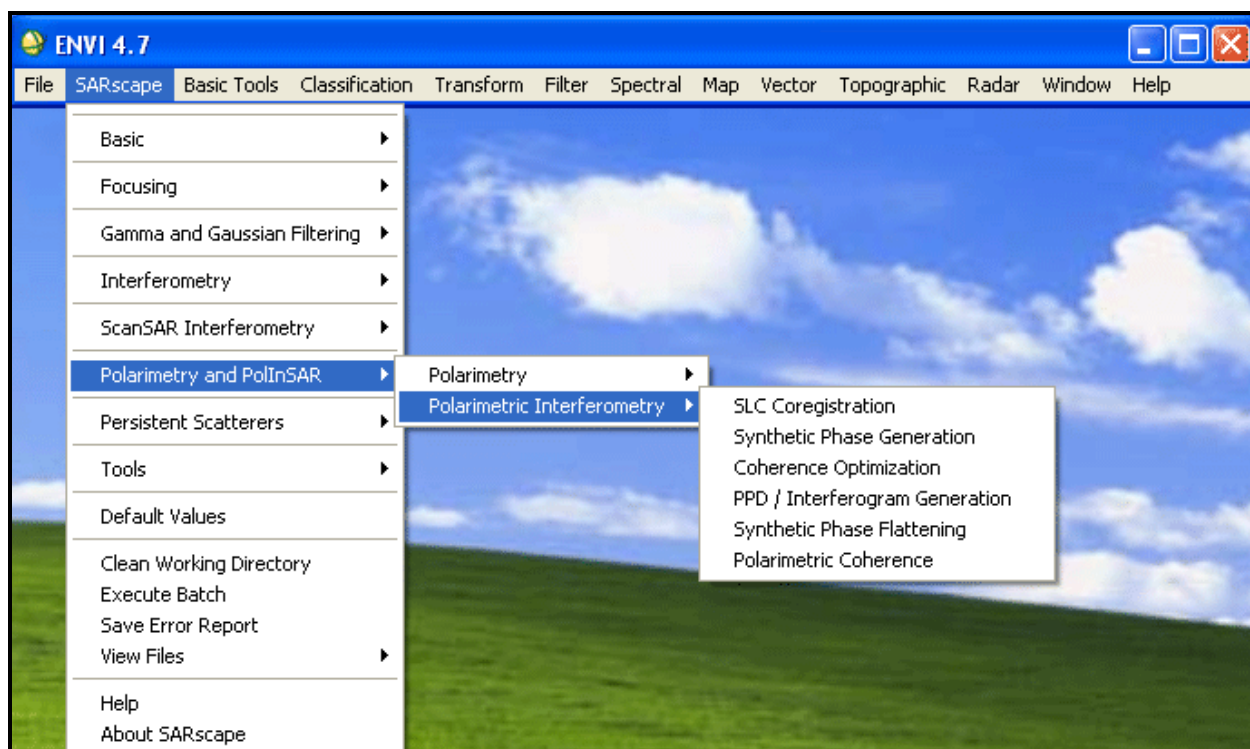
*Рис. 5. Полная поляризационная матрица.*





*Рис. 6. Классы объектов, различающиеся по физическому типу отражения, выделяемые SARscape.*

Еще одна возможность, представленная в SARscape, позволяет выполнять интерферометрическую обработку полностью поляризационных данных (так называемый PolInSAR). Меню этого модуля представлено на рисунке 7.



*Рис. 7. Меню модуля “Polarimetric Interferometry” SARscape.*

Конкретно этот модуль позволяет получить оптимизированную дифференциальную интерферограмму и оптимизированную когерентность, если на входе

используется интерферометрическая пара четырехполяризационных снимков. В дальнейшем, эти интерферограмма и когерентность могут быть использованы в качестве входных данных в модуле “Interferometry” для последующего расчета по ним ЦМР или карты смещений.

Такая технология позволяет, в частности, при мониторинге смещений снять вопрос об изменении отражающей поверхности (земля влажная – земля сухая, голая земля – подросшая трава, голые ветки – распутившиеся листья и другие варианты изменений, произошедших между съемками снимков интерферометрической пары, которые могли вызвать «ложные смещения», обусловленные разными отражающими поверхностями. Теперь, при использовании полностью поляриметрических снимков, можно классифицировать объекты по типу отражения на первом снимке пары, затем на втором снимке пары, и проследить – проявляются ли систематические или локальные изменения классов отражающих объектов (не переходит ли гладкая поверхность на первом снимке в шероховатую поверхность на втором, шероховатая поверхность в растительность, растительность в кустарник, редкий лес в плотный лес и т.д.). Если такие изменения классов пространственно совпадают со смещениями на карте смещений, рассчитанной по этой же паре снимков, то это – ложные смещения, вызванные изменением отражающей поверхности. Если же классы не изменяются, а на карте смещений есть смещения, то это – действительно произошедшие смещения одной и той же отражающей поверхности.

При построении ЦМР по полностью поляриметрическим данным аналогично можно определять по какой конкретно отражающей поверхности построена ЦМР (высоты чего конкретно определяются).

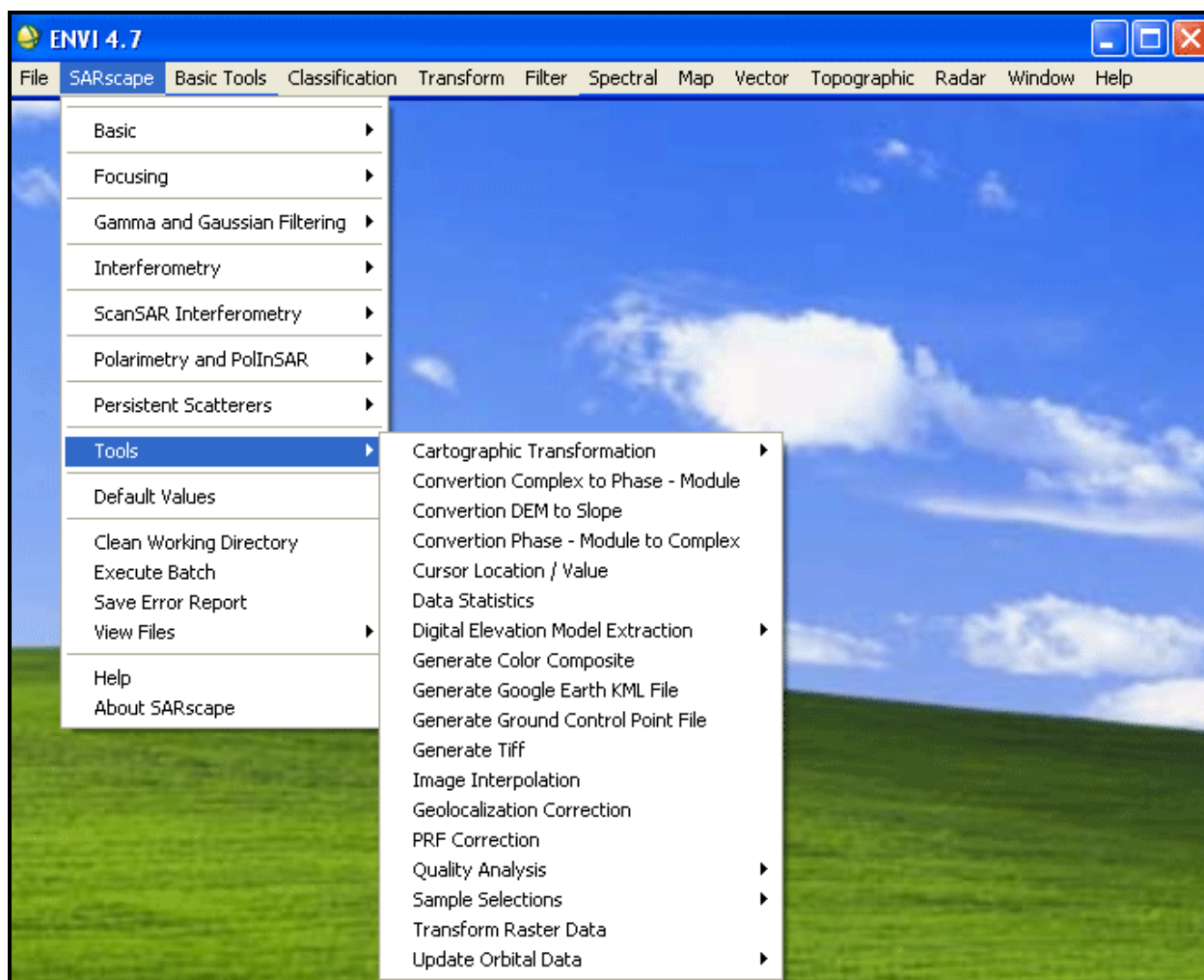
Еще одна вариация поляриметрической интерферометрии – это построение поляриметрических фазовых разностей, то есть интерферограмм по разным поляризациям одного и того же снимка. Особенность таких интерферограмм заключается в том, что между «снимками» (а фактически каналами одного снимка) интерферометрической пары абсолютно нулевая базовая линия и отсутствует временной промежуток между «снимками». Поэтому в такой интерферограмме в принципе отсутствует топографическая компонента фазы, а поскольку между съемками нет временного промежутка (в обработке участвуют каналы одного и того же снимка), то нет и реальных смещений. Однако на практике, особенно между ко- и кросс-поляризациями часто в таких интерферограммах все же присутствуют фазовые разности, которые обусловлены различными механизмами отражения одного и того же объекта в разных поляризациях. Анализ таких интерферограмм совместно с результатами поляриметрической классификации позволяет



дополнительно проанализировать отражающую поверхность, ее изменения (при мониторинговых съемках), и ее влияние на построение рельефа и анализ смещений интерферометрическим методом.

### Дополнительные инструменты

Еще одной дополнительной – и очень удобной – частью SARscape является меню “Tools” (рис. 8), которое предоставляет возможности обрабатывать как радарные снимки, так и просто растровые и векторные файлы. Рассмотрим эти функции подробнее.



*Рис. 8. Меню модуля “Tools” SARscape.*

Картографическая трансформация – функция позволяющая пересчитывать радарный снимок или любой растровый либо векторный файл из одной картографической проекции в другую. Также можно пересчитать координаты точки, в том числе, ее высоту. Для растрового файла есть функция вырезки одного файла (или нескольких файлов) по другому файлу, причем выходной файл (выходные файлы) будут точно обрезаны по этому

первому файлу и приведены к его пространственному разрешению, также все выходные файлы будут иметь одинаковое число рядов и колонок с опорным файлом.

Возможно также разделять комплексные данные (например, радарный снимок или интерферограмму) на фазовую и амплитудную составляющую. А можно из амплитудной и фазовой составляющих, наоборот, создать комплексный файл. Это применимо, например, для дифференциальной интерферограммы и амплитудного радарного снимка, которые вместе – в виде комплексного файла – представляют собой интересный объект для анализа.

Есть возможность расчета уклонов по имеющейся ЦМР.

Также присутствует очень удобная функция загрузки ЦМР из интернета. В этом меню доступны для загрузки следующие глобальные ЦМР: ACE, GLAS/ICESat, GTOPO30, RAMP, SRTM. Функция позволяет ввести имеющиеся радарные снимки на нужную территорию, затем выбрать нужную глобальную ЦМР, установить выходное разрешение этой ЦМР и ее выходную географическую проекцию, а также вычесть из этой ЦМР геоид (для интерферометрии необходимо использовать возвышения над эллипсоидом WGS-84), рассчитать уклоны. Выходной файл ЦМР будет обрезан так, чтобы покрывать всю территорию введенных снимков. Вместо входных снимков можно просто задать квадрат координат.

Утилита статистики позволяет ввести радарный снимок (или снимки, или участок снимка либо снимков) и рассчитать для входных данных следующие параметры: количество пикселей, минимальное и максимальное значение амплитуды отражения, моду, стандартное отклонение, фактор нормализации, медиану, среднее значение, радиометрическое разрешение (в дБ), эквивалентный коэффициент некогерентного накопления.

Имеется возможность создания различных видов цветных RGB композитов. Например, цветное радарное изображение, где в цветовых каналах – различные поляризации одного радарного снимка. Или цветовую комбинацию “multi-difference”, где в красном канале – разница амплитуд отражений первого и второго снимков, а в зеленом и синем каналах – соответственно, амплитуда второго и амплитуда первого снимка. На результирующем RGB-изображении, красным цветом будут видны произошедшие изменения, зеленым – преобладание амплитуды второго снимка над первым, и синим – наоборот.

Еще один вариант RGB-композиата, рассчитываемого по разновременным радарным снимкам – это ILU (Interferometric Land Use Image). Здесь в красном канале когерентность,

в зеленом – средняя амплитуда и в синем – разница амплитуд двух снимков. В таком случае, зеленые участки на ILU композите представляют собой леса, плотную растительность и участки «переналожения»; синие участки соответствуют поверхности воды; красные участки соответствуют почве без растительности, оголенным горным породам, либо сельскохозяйственным полям, на которых не произошли изменения в растительном покрове за период между съемками; желтым цветом на ILU композите будут выглядеть застроенные участки, что обусловлено сочетанием эффекта переналожения (зеленый канал) и стабильных отражателей (красный канал). Таким образом, этот очень распространенный RGB-композит в какой-то степени визуально напоминает оптический снимок в видимом диапазоне.

Следующая возможность позволяет создать \*.kml файл для визуализации снимков и результатов их обработки в Google Earth.

Функция создания файла наземных контрольных точек реализована таким образом, что точки можно вводить как вручную, так и интерактивно – из просмотрщика ENVI. Также точки могут быть импортированы из имеющегося \*.shp или \*.evf векторных файлов.

Функция “Generate tiff” позволяет сгенерировать из интерферограммы или дифференциальной интерферограммы цветной RGB-композит, причем он генерируется таким образом, что каждый полный спектр цветов (цветовой цикл) на этом RGB-композите соответствует перепаду фазовых значений на интерферограмме, равному  $2\pi$ . Другие типы данных (радарные снимки, когерентность, развернутая фаза и т.д.) с помощью этой функции могут быть сохранены в виде 8-битного \*.tiff файла, что позволяет составлять из них произвольные RGB-композиции.

“Image interpolation” позволяет выполнить усредняющую фильтрацию произвольного растрового файла и интерполяцию его значений в области фоновых значений.

“Geolocalization correction” и “PRF correction” позволяют скорректировать параметр частоты повторения импульса, неправильная запись которого, например, на спутнике Radarsat-1, вызывает значительные ошибки геолокализации. С помощью названных инструментов можно, определив на снимке как минимум две контрольные точки с известными координатами и высотой и максимально возможно разделенные между собой по направлению азимута, скорректировать значение частоты повторения импульса. Затем, с помощью этих же контрольных точек можно выполнить корректное геокодирование снимка.

“Quality analysis” позволяет выполнять валидацию ЦМР, построенной интерферометрическим методом. Валидация может быть выполнена относительно имеющейся опорной ЦМР либо относительно серии опорных контрольных точек. Результат валидации относительно опорной ЦМР – файл статистики отклонений в форматах \*txt и \*xls. Результат валидации относительно опорных точек с известными высотами – векторный файл с отклонениями высот для каждой опорной точки. Также существует возможность использовать на входе файл классификации типов ландшафта (полученный по результатам оцифровки соответствующих карт или, например, по результатам поляриметрической классификации полностью поляризационного радарного снимка). Если такой файл используется – файл статистики величин отклонений высот от опорных значений вычисляется отдельно для различных типов ландшафта.

“Sample selection” позволяет вырезать из серии снимков, характеризующихся неполным перекрытием, максимально возможную общую область, которая полностью покрывается всеми введенными снимками, либо вырезать из серии введенных геокодированных снимков одну и ту же область, определяемую квадратом координат либо векторным файлом. Можно вместо геокодированных снимков использовать корегистрированные снимки в координатах азимут-наклонная дальность (тогда квадрат координат или векторный файл также должны быть в этой системе координат).

“Update orbital data” позволяет значительно уточнить орбиты для спутников ERS-1, ERS-2 и ENVISAT с помощью поставляемых через интернет файлов коррекции орбиты. Одна из коллекций файлов коррекции орбиты ведется голландским институтом Delft Institute for Earth-Oriented Space Research (DEOS orbits) [1,2]. Вторая коллекция ведется германским аэрокосмическим агентством DLR. Уточнение орбит с помощью этих файлов коррекции наиболее актуально для задач интерферометрии, поскольку пиксельная точность геолокации для вышеназванных спутников присутствует и без коррекции орбиты. В случае же интерферометрической обработки важно уточнение геолокации на субпиксельном уровне. Такая коррекция орбиты как правило сразу же четко визуализируется при построении интерферограмм, поскольку из них в случае более корректной записи орбитальных параметров удаляется диагональная фазовая помеха.

### **Примеры обработки**

Ниже представлена серия типовых результатов обработки радарных данных, выполненной в программном комплексе SARscape.

На рисунке 9 представлена амплитуда исходного и фильтрованного радарного изображения. На рисунке 10 – геокодированный RGB-композит типа Interferometric Land Use.

На рисунке 11 представлена ЦМР на всю территорию Швейцарии, построенная специалистами SARMAP по данным тандемной интерферометрической съемки со спутников ERS-1 и ERS-2 в конце 1990-х годов [3]. Точность ЦМР варьируется от 7 до 15 метров по высоте. Пространственное разрешение – 25 метров.

На рисунке 12 приведены смещения, рассчитанные по данным дифференциальной интерферометрической обработки серии снимков TerraSAR-X [4], а на рисунке 13 – сползание в Северный ледовитый океан ледников за период всего в 30 минут (тандемная интерферометрия ERS-2 – ENVISAT) [5]. На рисунке 14 показаны оседания земной поверхности над Уренгойским нефтегазовым месторождением (север Тюменской области) [6-8].

На рисунке 15 показаны результаты поляриметрической классификации полностью поляриметрических данных ALOS PALSAR (JAXA).





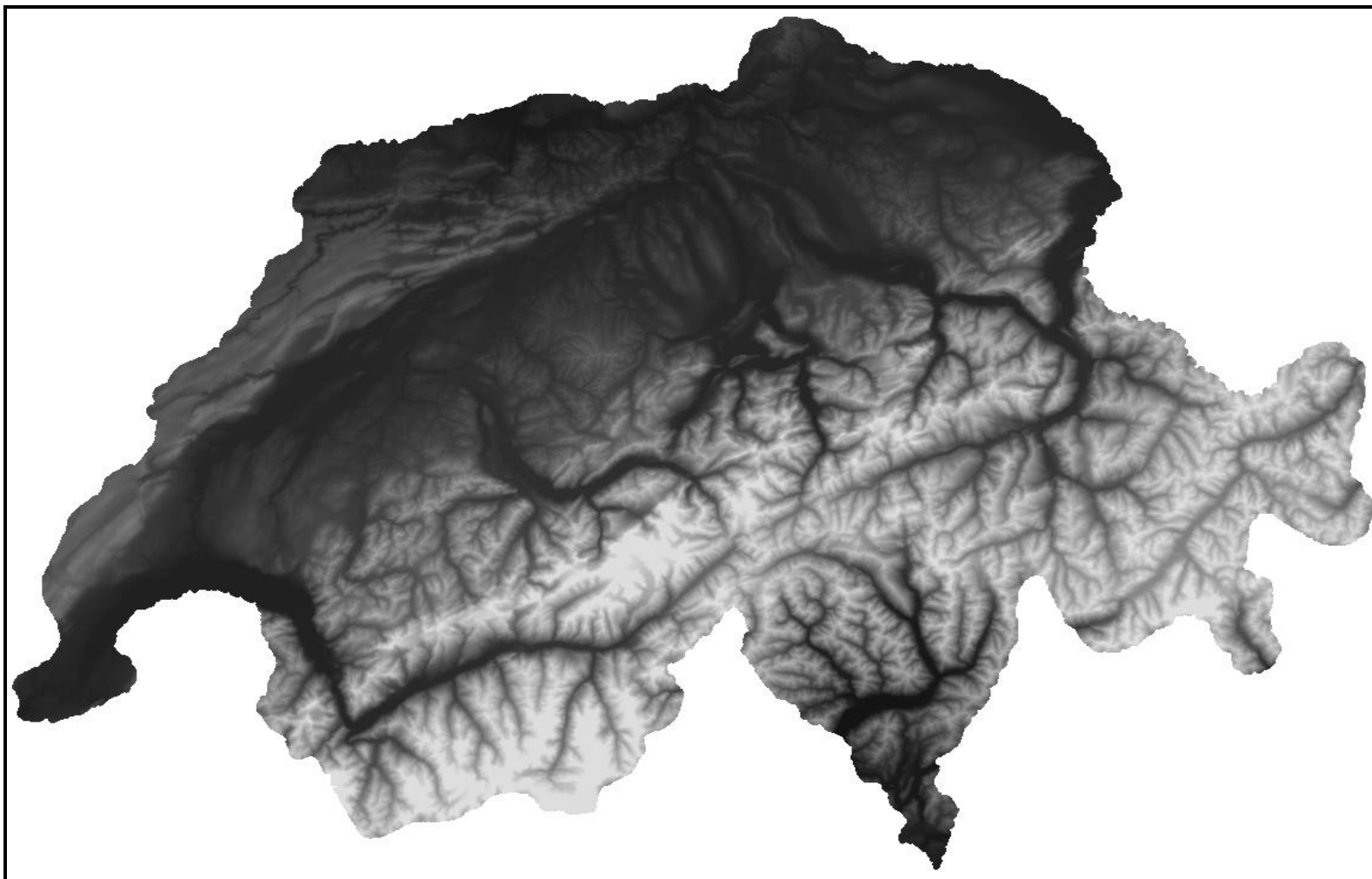
*Рис. 9. Исходная (сверху) и фильтрованная мультитременным фильтром (снизу) амплитуда радарного снимка TerraSAR-X (Infoterra GmbH). Используются функции импорта, некогерентного накопления, корегистрации и мультитременной фильтрации (Совзонд, 2010).*





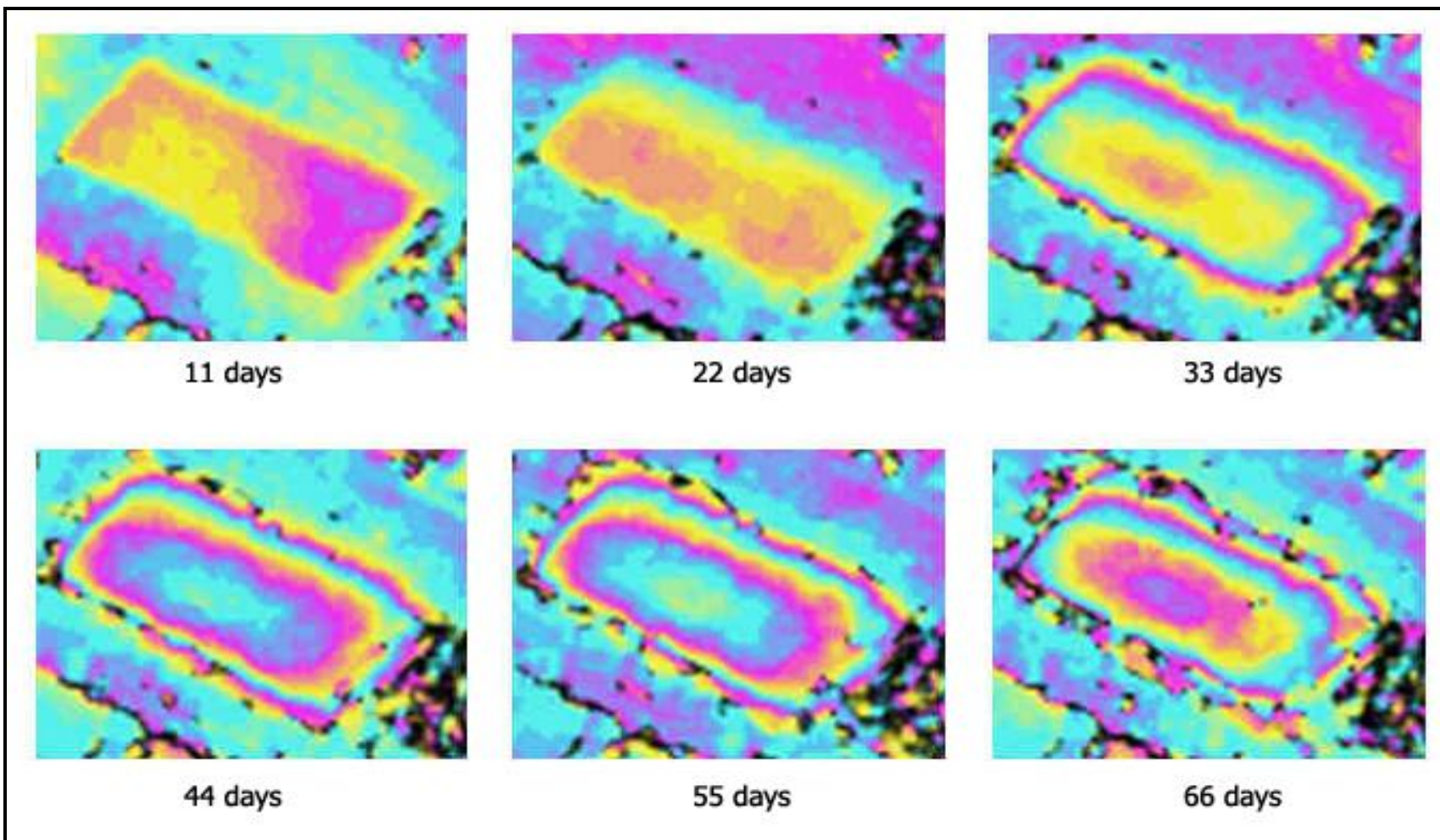
*Рис. 10. Геокодированный RGB-композит типа Interferometric Land Use, рассчитанный по двум снимкам TerraSAR-X (Infoterra GmbH). Растительность – зеленая, вода – темно синяя, здания – желтые и красные, дороги и поверхности без растительности – красные. Используются функции импорта, расчета когерентности, некогерентного накопления, геокодирования и расчета RGB-композиата ILU (Совзонд, 2010).*



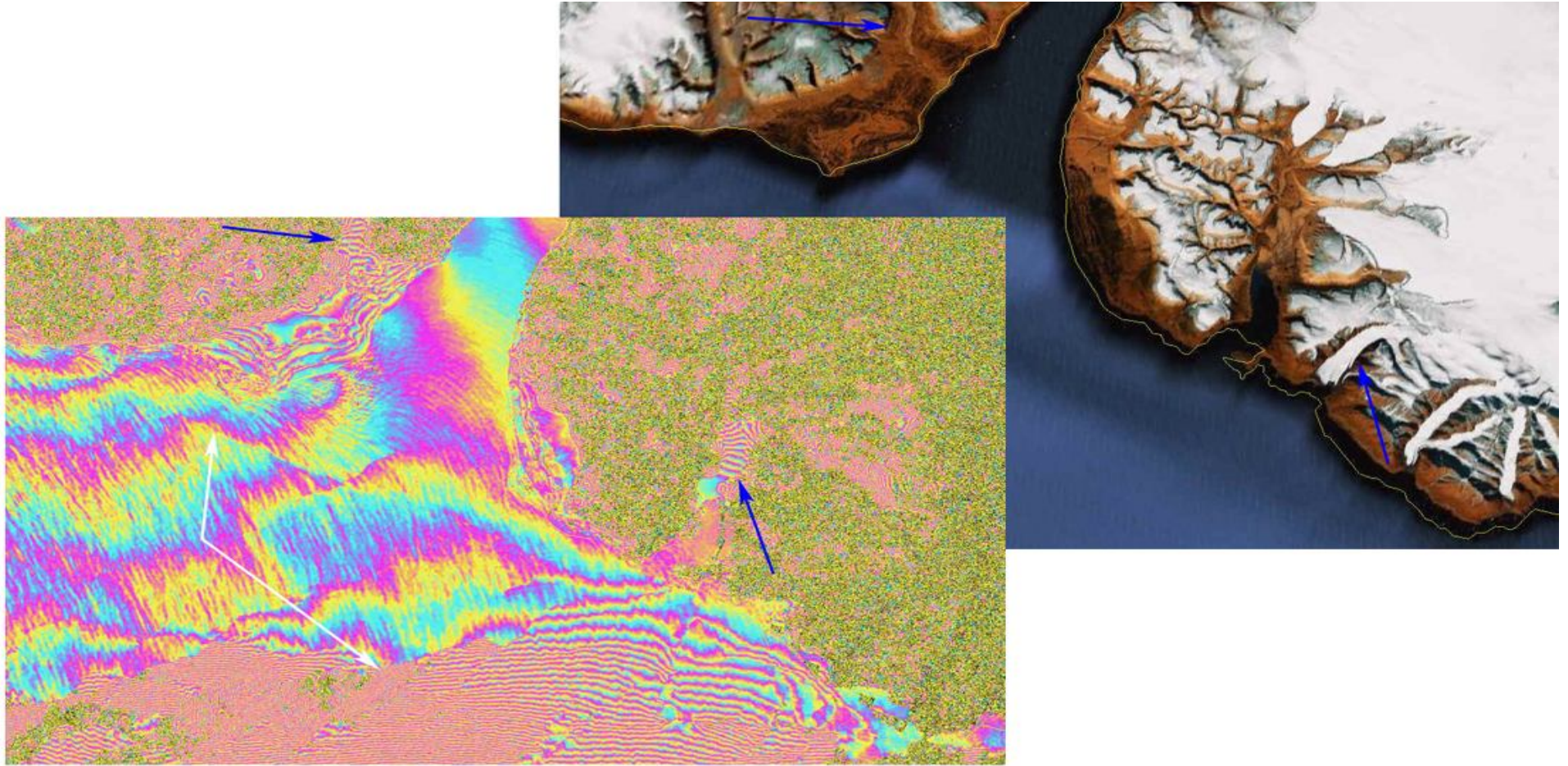


*Рис. 11. ЦМР, построенная специалистами SARMAP (разработчиками SARscape) по данным тандемной интерферометрической съемки со спутников ERS-1 и ERS-2 в конце 1990-х годов. Использованные функции: фокусировка радиолокационных голограмм, интерферометрическая обработка с получением на выходе ЦМР, создание мозаики выходных ЦМР, вырезка по векторному файлу государственной границы Швейцарии [3].*



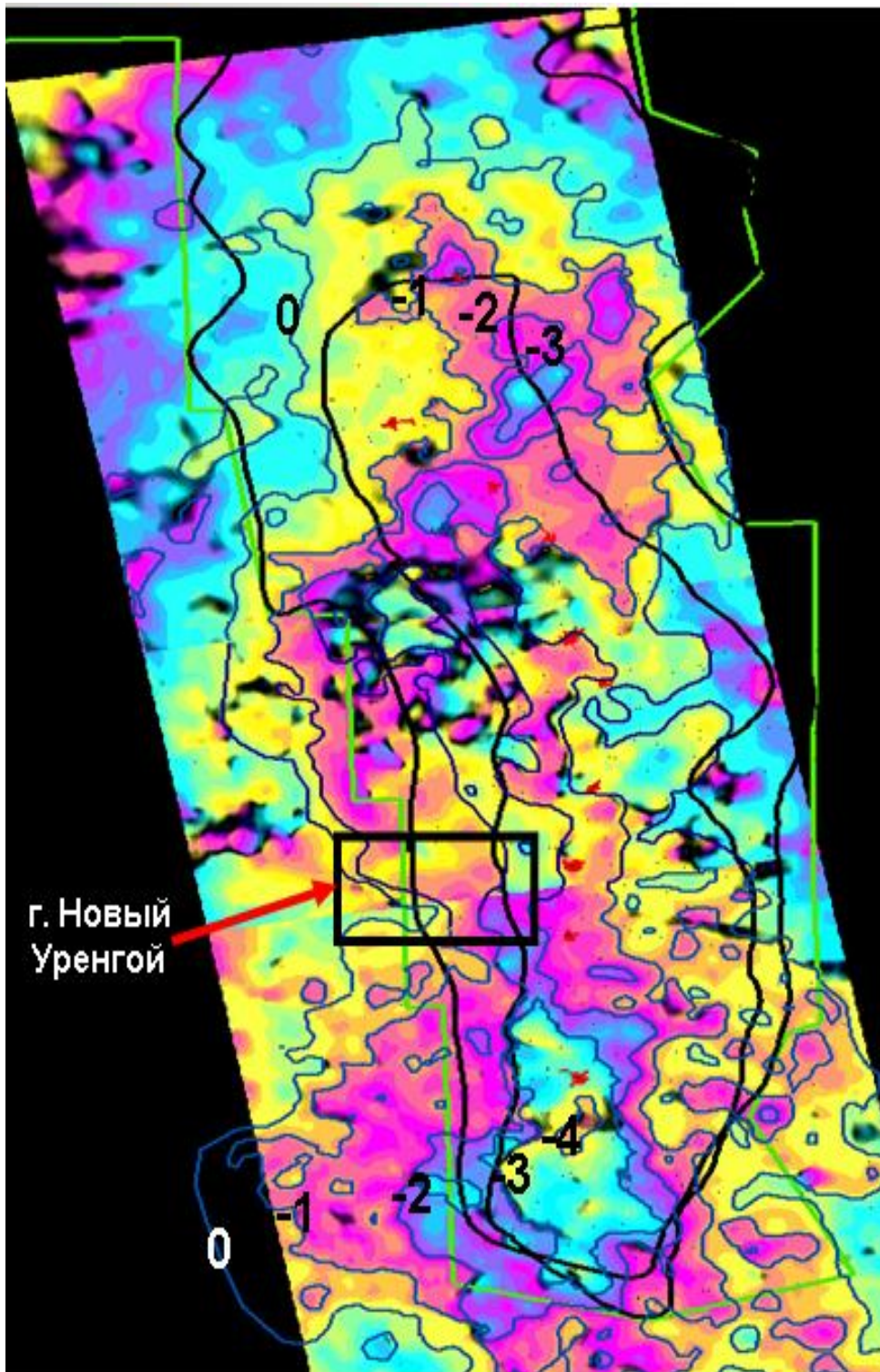


*Рис. 12. Осадка в зоне строительства здания, рассчитанная по данным дифференциальной интерферометрической обработки серии снимков TerraSAR-X [4]. Под каждой интерферограммой указан временной интервал между снимками пары. Каждый цветовой цикл на интерферограммах соответствует оседаниям, равным половине длины волны (т.е. 1,5 см). Использованы функции модулей Basic и Interferometry*

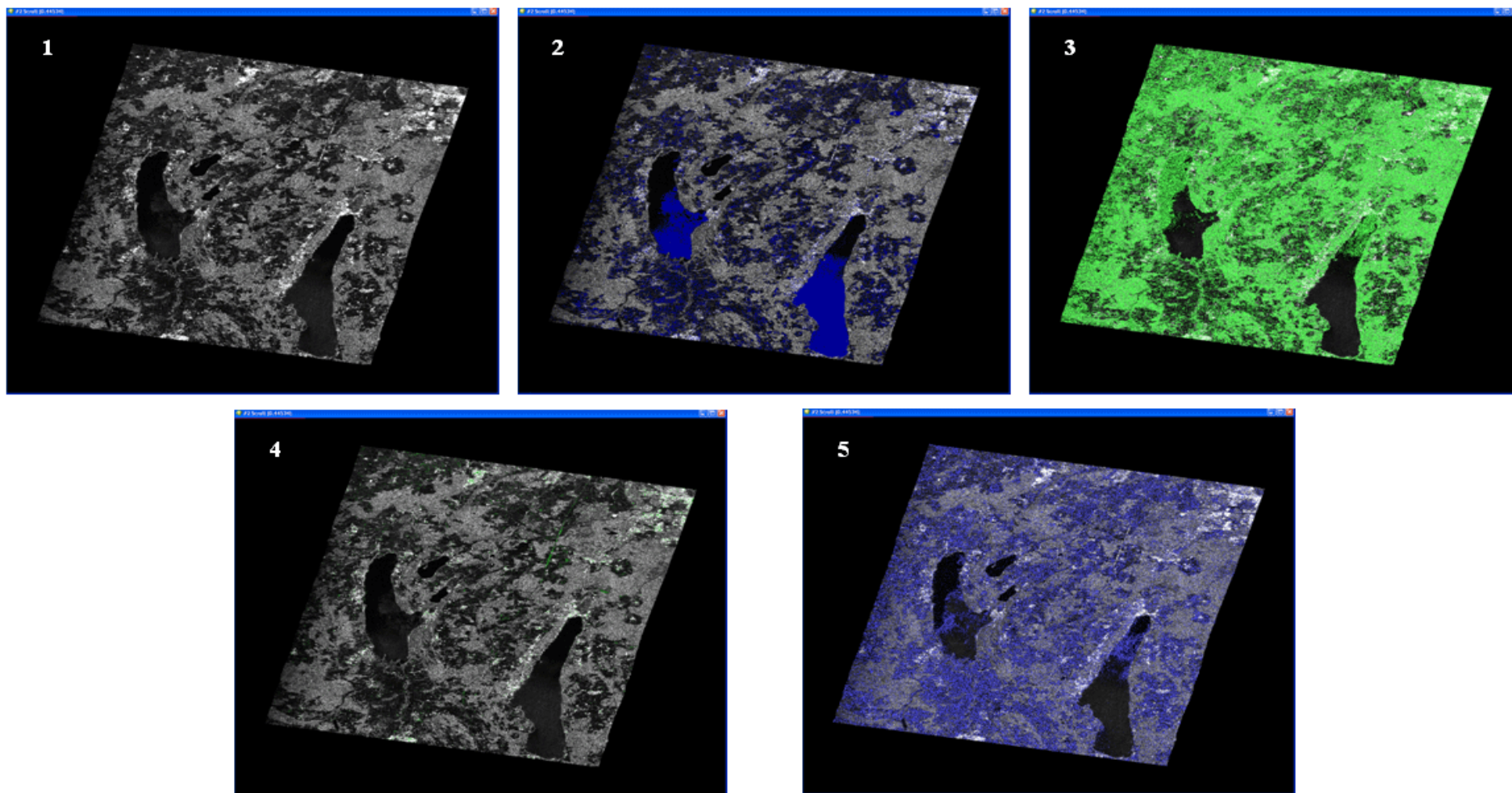


**Рис. 13.** Сползание ледников в Северный ледовитый океан по данным тандемной интерферометрии ERS-2 – ENVISAT за период всего в 30 минут. Оползание ледников показано синими стрелками, амплитуда оползания – десятки сантиметров (каждый цветовой цикл – 2,75 см). Белыми стрелками показаны границы ледовых массивов в бухте Баффин, движущихся относительно друг друга [5]. Справа – изображение из Google Earth. Использованы функции модулей Basic и Interferometry, а также утилита создания \*.kml файла для Google Earth.





*Рис. 14. Дифференциальная интерферограмма, показывающая смещения земной поверхности на Уренгойском нефтегазовом месторождении за период 2007-2008 годов по результатам обработки данных Radarsat-1 (изолинии показывают оседания в см). Использованы функции модулей Basic и Interferometry, а также утилита коррекции значения «частоты повторения импульса» [6-8].*



*Рис. 15. Результаты поляриметрической классификации четырехполяризационного снимка ALOS PALSAR (JAXA). 1 – амплитуда поляризации ГГ; 2 – выделение воды и гладкой поверхности; 3 – выделение растительности; 4 – выделение диполей (столбов, опор ЛЭП и т.д.); 5 – выделение участков суши без растительности или с невысокой растительностью. Использованы функции модуля Polarimetry и Polarimetric Interferometry. Совзонд, 2010.*

## Литература

1. R. Scharroo, P.N.A.M. Visser. Precise orbit determination and gravity field improvement for the ERS satellites, *J. Geophys. Res.*, 103, C4, 8113-8127, 1998;
2. E. Doornbos, R. Scharroo, H. Klinkrad, R. Zandbergen, B. Fritsche. Improved modelling of surface forces in the orbit determination of ERS and Envisat Canadian Journal of Remote Sensing, Volume 28, No. 4, August 2002;
3. C. Poidomani. National-Scale DEM generation using ERS Tandem data in alpine regions, ERS-ENVISAT Symposium, 2000;
4. Материалы Интернет-сайта [www.sarmap.ch](http://www.sarmap.ch);
5. P. Pasquali, A. Cantone, M. Barbieri, M. Engdahl. Monitoring of sea ice dynamic by means of ERS-ENVISAT Tandem Cross-Interferometry, ESA FRINGE Workshop, Frascati, 2009.
6. Ю.Б. Баранов, Ю.И. Кантемиров, Е.В. Киселевский, С.Э. Никифоров и др. Мониторинг смещений земной поверхности на разрабатываемых месторождениях углеводородов с помощью комплекса космических и геодезических методов / Недропользование – XXI век. – 2009, №1, с. 60-64;
7. Ю.Б. Баранов, Ю.И. Кантемиров, Е.В. Киселевский, С.Э. Никифоров и др. Опыт комплексного мониторинга смещений земной поверхности на разрабатываемых месторождениях углеводородов с помощью геодезических и космических методов / Геоматика. – 2009, №1, с. 71-74;
8. Р.О. Самсонов, Н.А. Гафаров, Ю.Б. Баранов, Ю.И. Кантемиров и др. Космический мониторинг смещений земной поверхности на разрабатываемых месторождениях углеводородов ОАО «Газпром» / Газовая промышленность. – 2009, спецвыпуск «Освоение и разработка месторождений углеводородов», с. 29-33;

ведущий специалист

отдела программного обеспечения

ООО «Компания Совзонд»

Специализация – обработка радарных данных ДЗЗ

тел. +7 (495) 988-75-22 доб. 765

e-mail: [y\\_kantemirov@sovzond.ru](mailto:y_kantemirov@sovzond.ru)

Адрес: 115563, г. Москва, ул. Шипиловская, 28а, Бизнес центр "Милан"