

Ю.И. Кантемиров (Компания «Совзонд»)

В 2004 г. окончил РГУ нефти и газа им. И.М. Губкина. После окончания университета работал младшим научным сотрудником лаборатории космической информации для целей газовой промышленности в ООО «Газпром ВНИИГАЗ». С 2010 г. работает в компании «Совзонд» ведущим специалистом отдела программного обеспечения.

Обзор основных методик обработки радарных данных ДЗЗ и их реализация в программном комплексе SARscape

ОБЩИЕ СВЕДЕНИЯ О ПРОГРАММНОМ КОМПЛЕКСЕ SARSCAPE

В настоящей статье рассматриваются основные методики обработки радарных данных дистанционного зондирования Земли (ДЗЗ), реализованные в программном комплексе SARscape, а также приводятся примеры практического применения обработанных радарных данных.

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 радарных снимков. Краткая спецификация модулей приводится ниже.

МОДУЛИ ПРОГРАММНОГО КОМПЛЕКСА SARSCAPE

SARscape Basic

Модуль включает следующие возможности обработки данных: фокусировку, импорт комплексных и амплитудных данных, корегистрацию, фильтрацию (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, закачки из Интернета, интерполяции цифровых моделей рельефа (ЦМР), картографических и геодезических преобразований, коррекции орбит радарных спутников, преобразований растровых файлов и т. д.

SARscape Focusing

Модуль расширяет возможности фокусировки «сырых» радарных 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 радарных фильтров. Алгоритмы фильтрации, разработанные PRIVATEERS N.V., основаны на Гамма-Гауссовом распределении спекл-шума по сцене. Они особенно эффективны для уменьшения спекл-шума, так как сохраняют отражающие характеристики радиосигнала, структурные свойства и пространственное разрешение, особенно в сильно текстурированных радарных изображениях и в присутствии антропогенных объектов.

SARscape Interferometry

Модуль предназначен для обработки интерферометрических радарных 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 представляют 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 радарных 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 радарный 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 радарных 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

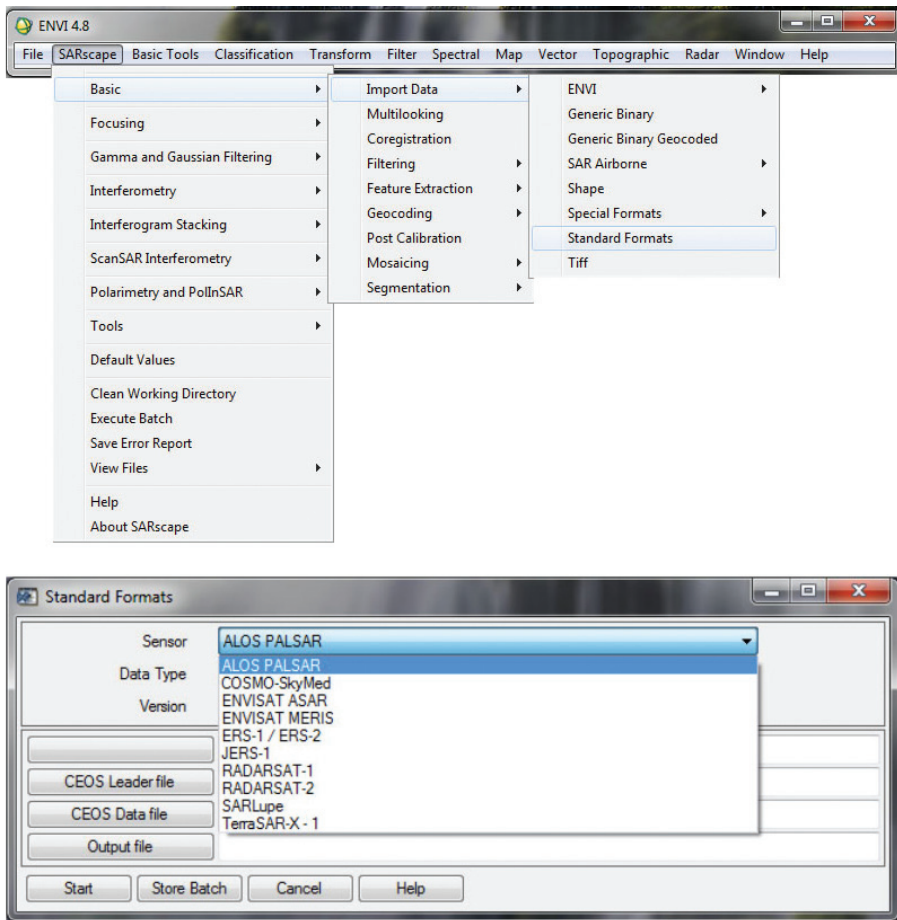


Рис. 1. Меню импорта спутниковых радарных данных в SARscape

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 маршейдерско-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 радарных спутников, включая все режимы съемки и все возможные форматы поставки. Интерфейс импорта спутниковых радарных данных приведен на рисунке 1.

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 цепочку, принимались и фокусировались на различных станциях 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-Гауссовых фильтров);
- получение бесшовных мозаик изображений и ЦМР;
- сегментацию;
- корегистрацию;
- вычисление файла средних значений произвольного параметра (например, средняя амплитуда по серии снимков), файла стандартных отклонений, а также файла максимальных и минимальных значений и т. д.

Также 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.

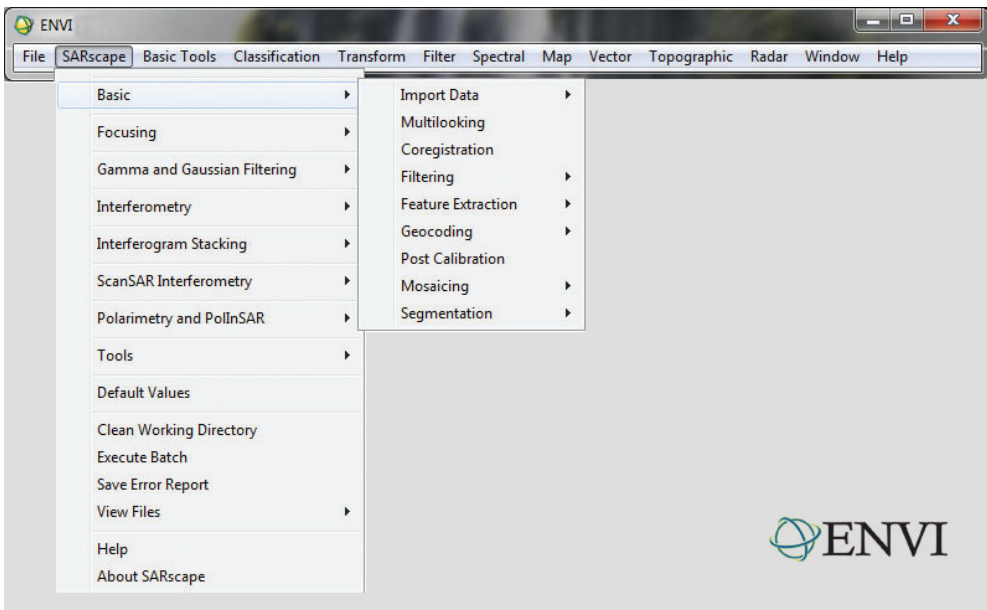


Рис. 2. Меню базовых функций SARscape

ИНТЕРФЕРОМЕТРИЯ

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

Модуль Interferometry, меню которого представлено на рис. 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 1/100 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 интерферо-

метрию (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);

- четырехпроходную дифференциальную интерферометрию (строятся интерферограммы по первому и второму, первому и третьему, первому и четвертому, второму и третьему, второму и четвертому и, наконец, по третьему и четвертому снимкам четырехпроходной цепочки; затем оцениваются смещения на дату каждой из 4 съемок);
- компенсацию набега фазы по высоте с использованием опорной ЦМР, модели эллипсоида или адаптивного алгоритма, основанного на вычислении средней по площади снимка частоты интерференционных циклов;
- фильтрацию интерферограмм и расчет когерентности между фазами снимков интерферометрической пары тремя различными фильтрами на

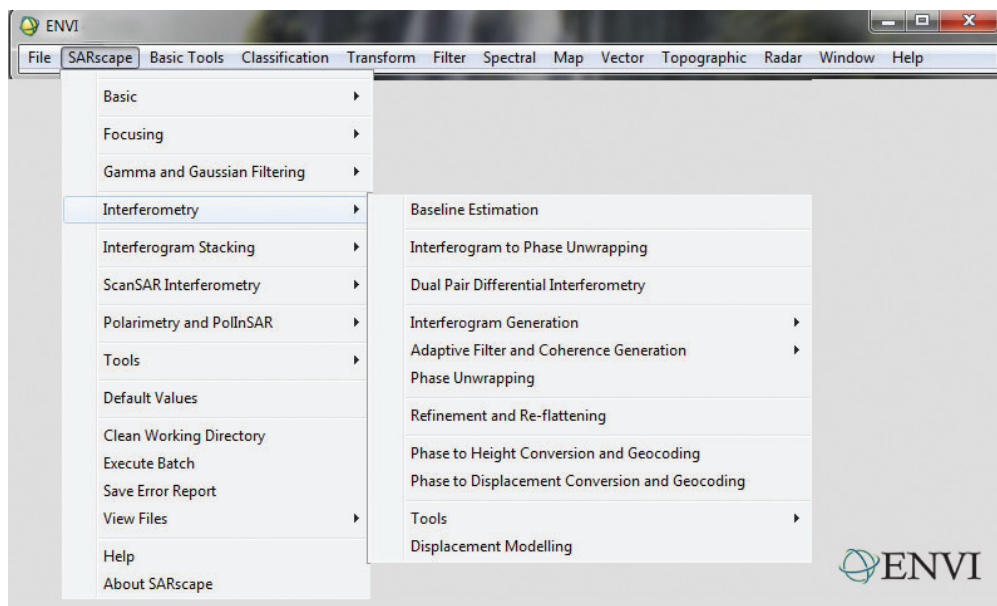


Рис. 3. Меню модуля Interferometry SARscape

выбор (усредняющий, адаптивный и фильтр Голдстейна);

- развертку фазы двумя различными методами (метод растущей области и метод потока минимальной стоимости);
- коррекцию орбиты по точкам с известной высотой, либо с использованием опорной ЦМР и адаптивным набором точек;
- вторую итерацию 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 карт смещений и деформаций.

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 быстрой автоматической корегистрации); редактировать развернутую фазу и удалять (либо исправлять) арте-

факты развертки; выполнять сшивку ЦМР различного разрешения между собой с помощью вейвлет-алгоритмов, отслеживать метровые горизонтальные подвижки ледовых массивов по амплитуде радарных снимков, удалять атмосферные артефакты из интерферограмм с использованием данных синхронных с радарными оптических съемок и др.

Дополнительные возможности интерферометрии представлены в модуле интерферометрии широкополосного режима (SARscape ScanSAR Interferometry). 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 средствами, аналогичными средствам модуля SARscape Interferometry. Преимущество интерферометрии широкополосного режима состоит в том, что можно рассчитывать интерферограммы по снимкам площадью 400x400 км с пространственным разрешением 75 м.

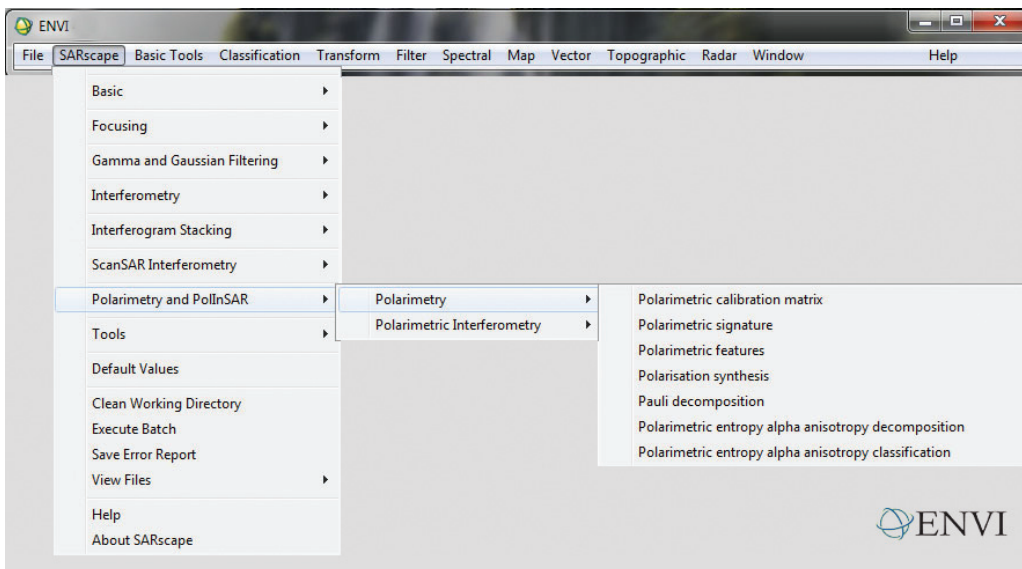


Рис. 4. Меню модуля Polarimetry SARscape

Для расчета смещений и деформаций земной поверхности и сооружений с миллиметровой точностью предназначен модуль SARscape Interferogramm Stacking, включающий в себя две технологии: Persistent Scatterers (PS) и Small Baselines (SBas). Входными данными для этого модуля являются 20-40 проходные интерферометрические серии снимков. На выходе — не только результирующая карта смещений, но и графики развития смещений во времени для каждой точки этой карты (т. е. анализ динамики происходящих смещений). Для этих методов 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 уменьшение сложностей, связанных с разверткой фазы. К ограничениям метода PS можно отнести необходимость наличия значительного количества высококогерентных точек. Такая плотность постоянных отражателей достигается на застроенных территориях и на территориях без растительности.

ПОЛЯРИМЕТРИЯ И ПОЛЯРИМЕТРИЧЕСКАЯ ИНТЕРФЕРОМЕТРИЯ

Отдельно рассмотрим модуль поляриметрии и поляриметрической интерферометрии. Данный модуль специально предназначен для обработки радарных снимков, сделанных в четырехполяризационном режиме, позволяющем генерировать полную поляризационную матрицу. Уникальная особен-

ность полностью поляриметрических данных состоит в возможности классификации объектов на снимке по физическому типу отражения. Меню модуля Polarimetry представлено на рис. 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 (рис. 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 (рис. 6). Есть и другие методы, позволяющие выделять другое (большее или меньшее) число классов.

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

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

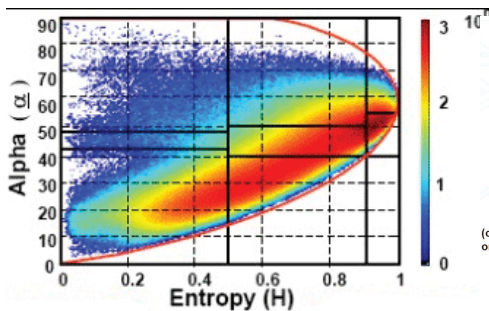


Рис. 5. Полная поляризационная матрица

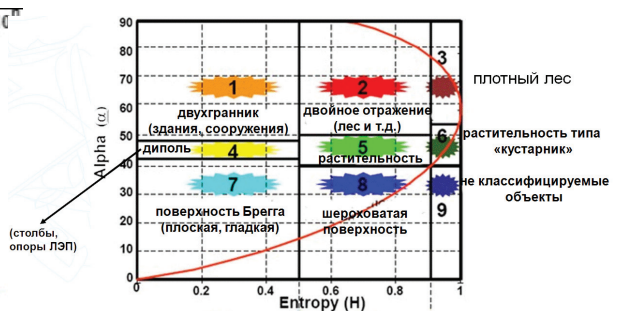


Рис. 6. Классы объектов, различающиеся по физическому типу отражения, выделяемые SARscape

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 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, т.е. 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. 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 часто в таких интерферограммах все же присутствуют фазовые разности, которые

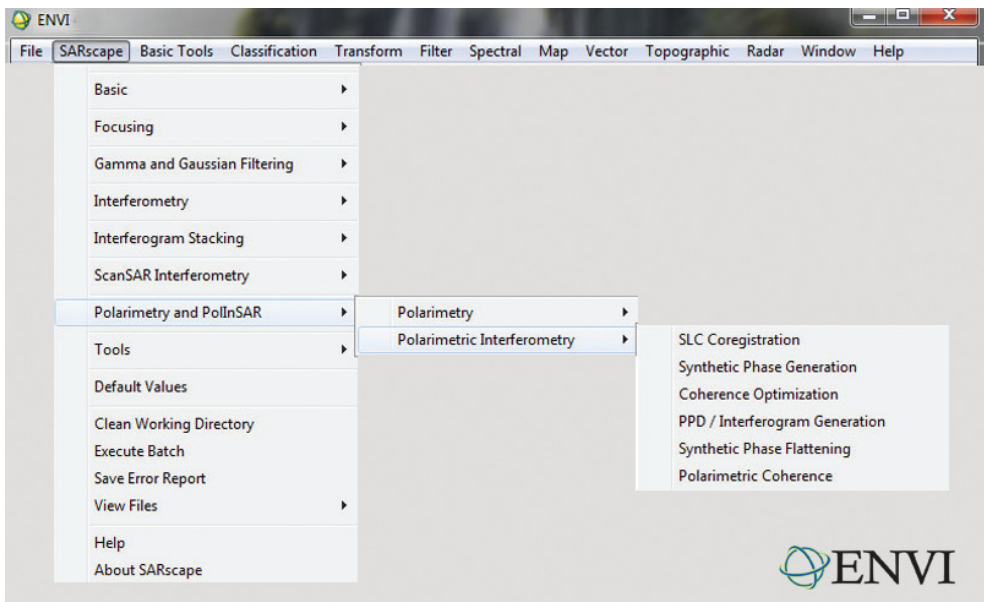


Рис. 7. Меню модуля Polarimetry and polarimetric interferometry SARscape

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, а также выполнять классификацию объектов.

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.

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 составляющие. 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.

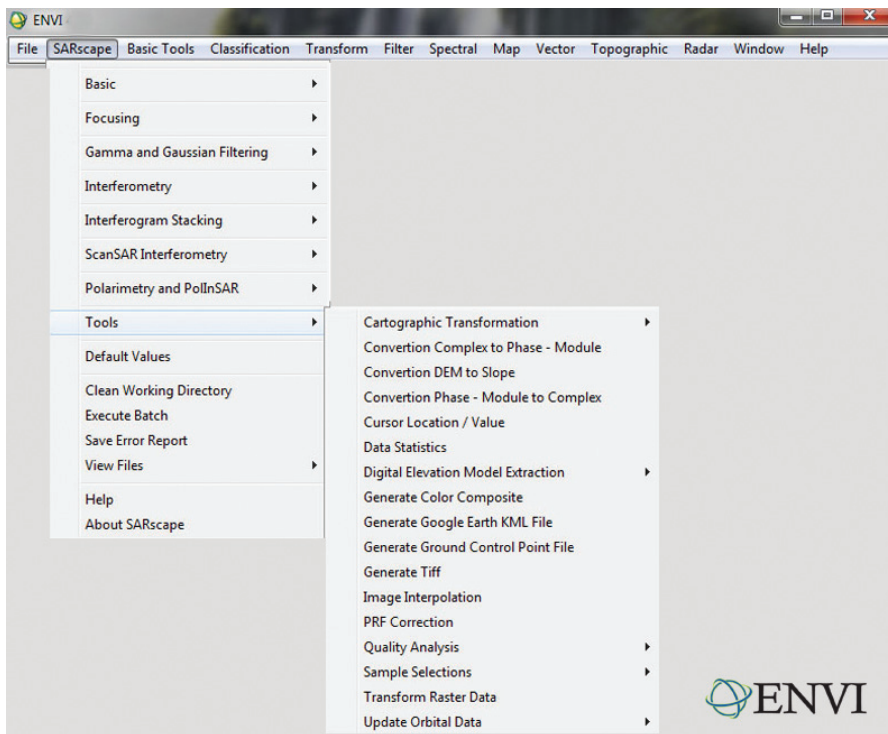


Рис. 8. Меню модуля Tools SARscape

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 значения 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-композигов. Например, цветного радарного изображения, где в цветовых каналах – различные поляризации одного радарного снимка. Или цветовой комбинации 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, синим — наоборот.

Еще один вариант RGB-композигов, 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-композигов 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-композигов будут выделяться застроенные участки, что обусловлено сочетанием эффекта переналожения (зеленый канал) и стабильных отражателей (красный канал). Таким образом, этот очень распространенный RGB-композигов 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-композигов, причем он генерируется таким образом, что каждый полный спектр цветов (цветовой цикл) на этом RGB-композигове соответствует перепаду фазовых значений на интерферограмме, равному 2π . 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-композигови.

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, 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 поляризованного 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 должен 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 интерфе-

рограмм, 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 рис. 11 представлена ЦМР на всю территорию Швейцарии, построенная специалистами SARMAP по данным тандемной интерферометрической съемки

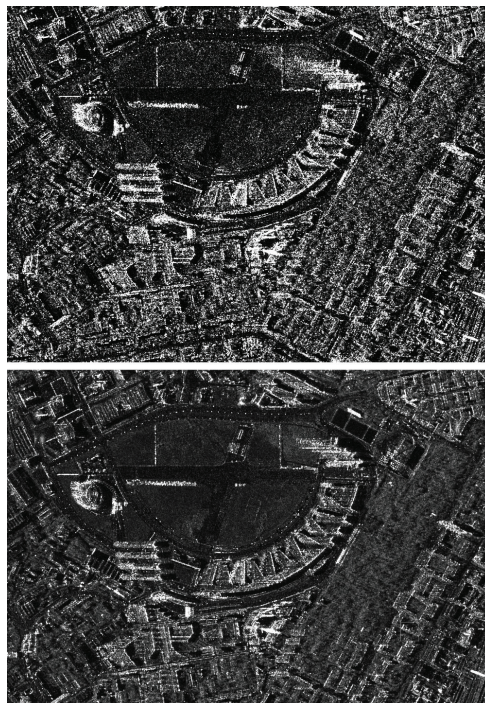


Рис. 9. Исходная (сверху) и фильтрованная мультивременным фильтром (снизу) амплитуда радарного снимка TerraSAR-X; использованы функции импорта, некогерентного накопления, корегистрации и мультивременной фильтрации (Компания «Совзонд», 2012 г.)



Рис. 10. Геокодированный RGB-композит *mu*na 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; использованы функции импорта, расчета когерентности, некогерентного накопления, геокодирования и расчета RGB-композиата ILU (Компания «Совзонд», 2012 г.)

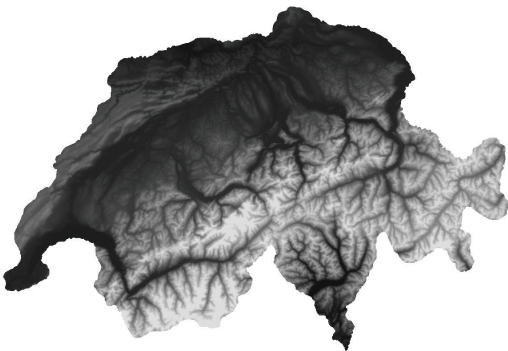


Рис. 11. ЦМР, построенная специалистами SARMAP (разработчиками SARscape) по данным тандемной интерферометрической съемки со спутников ERS-1 и ERS-2 в конце 1990-х гг.; использованные функции: фокусировка радарных голограмм, интерферометрическая обработка с получением на выходе ЦМР, создание мозаики выходных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

со спутников ERS-1 и ERS-2 в конце 1990-х гг. [3]. Точность ЦМР варьируется от 7 до 15 м по высоте. Пространственное разрешение — 25 м.

На рис. 12 приведены смещения, рассчитанные по данным дифференциальной интерферометрической обработки серии снимков TerraSAR-X [4], а на рис. 13 — сползание в Северный Ледовитый океан ледников за период всего в 30 минут (тандемная интерферометрия ERS-2 — ENVISAT) [5].

На рис. 14 показаны оседания земной поверхности над Уренгойским нефтегазовым месторождением (север Тюменской области) [6–8].

На рис. 15 показаны результаты поляриметрической классификации полностью поляриметрических данных ALOS/PALSAR.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

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,

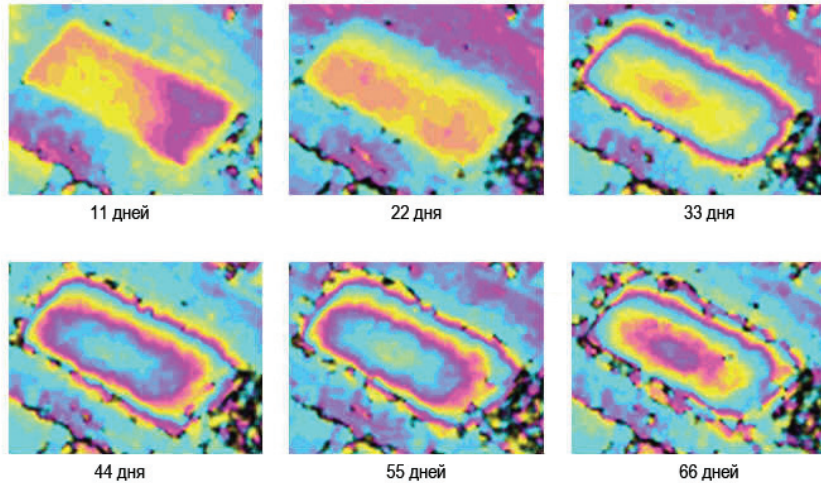


Рис. 12. Осадка в зоне строительства здания, рассчитанная по данным дифференциальной интерферометрической обработки серии снимков TerraSAR-X [4]. Под каждой интерферограммой указан временной интервал между снимками пары; каждый цветовой цикл на интерферограммах соответствует оседаниям, равным половине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

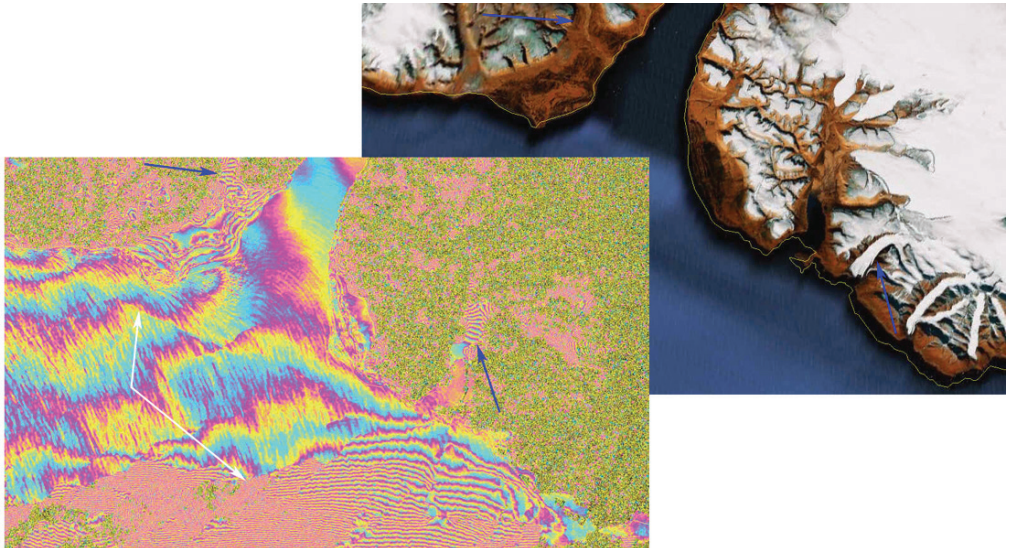


Рис. 13. Сползание ледников в Северный Ледовитый океан по данным тандемной интерферометрии ERS-2 — ENVISAT за период всего в 30 минут. Оползание ледников показано синими стрелками, амплитуда оползания — десятки сантиметров (каждый цветовой цикл — 2,75 см). Белыми стрелками показаны границы ледовых массивов 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

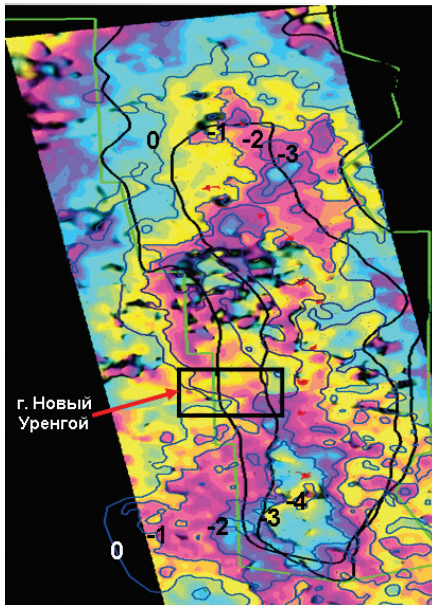
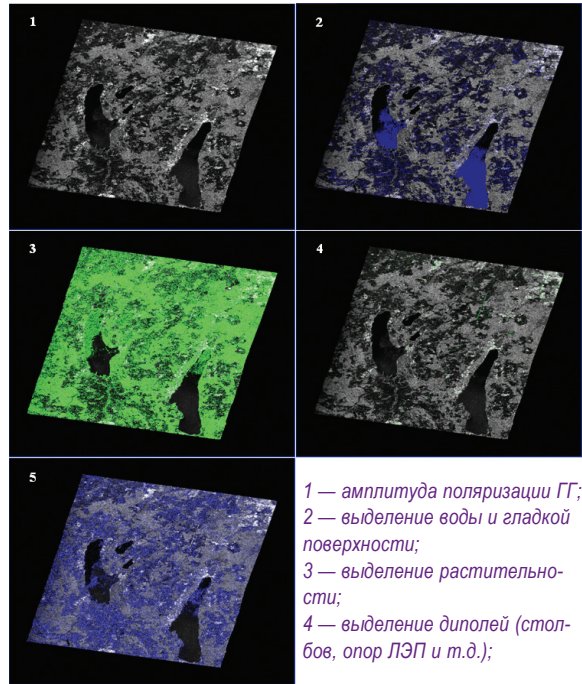


Рис. 14. Дифференциальная интерферограмма, показывающая смещения земной поверхности на Уренгойском нефтегазовом месторождении за период 2007–2008 гг. по результатам обработки данных RADARSAT-1 (изолинии показывают оседания в см). Использованы функции модулей Basic и Interferometry, а также утилита коррекции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



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 (Компания «Совзонд», 2010 г.).

Рис. 15. Результаты поляриметрической классификации четырехполяризационного снимка ALOS/PALSAR (JAXA)

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;

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 помо-

щью 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.