

Ю.Б. Баранов (ВНИИГАЗ)

В 1978 г. окончил Московский геологоразведочный институт (Российский государственный геологоразведочный университет – РГГРУ). В настоящее время – доктор геолого-минералогических наук, профессор кафедры геоинформатики РГГРУ и начальник лаборатории космической информации для целей газовой промышленности ООО «ВНИИГАЗ».

Е.В. Киселевский («Газпром»)

В 1976 г. окончил Московский горный институт. В настоящее время – начальник отдела маркшейдерско-геодезического и информационного обеспечения недропользования ОАО «Газпром».

Ю.И. Кантемиров (ВНИИГАЗ)

В 2004 г. окончил РГУ нефти и газа им. И.М. Губкина. После окончания университета работает в ООО «ВНИИГАЗ», в настоящее время – младший научный сотрудник лаборатории космической информации для целей газовой промышленности.

М.А. Болсуновский (Компания «Совзонд»)

В 1990 г. окончил Киевское высшее инженерное радиотехническое училище. С 2004 г. работает в компании «Совзонд», в настоящее время – заместитель генерального директора.

Построение ЦМР по результатам интерферометрической обработки радиолокационных изображений ALOS PALSAR

Задача получения цифровых моделей рельефа (ЦМР) на территории объектов добычи, транспорта и хранения нефти и газа в настоящее время является одной из наиболее актуальных для ОАО «Газпром» в части картографического обеспечения производственной деятельности. Это объясняется многими причинами. Готовятся к разработке новые месторождения, вводятся в эксплуатацию более глубокие продуктивные горизонты уже разрабатываемых месторождений, проектируются новые объекты наземного обустройства месторождений и нефтегазотранспортной инфраструктуры. Для ряда месторождений выполняется мониторинг смещений земной поверхности, вызванных подработкой залежей углеводородов, интерферометрическим методом, для чего также необходим высокоточный опорный рельеф. Наконец, цифровые модели рельефа используются в научных исследованиях, для моделирования геодинамических напряжений, анализа линейментов, структурного и геоморфологического дешифрирования и т. д.

Как известно, существует несколько методов получения ЦМР. Можно отметить широко применяемую спутниковую и авиационную стереосъемку (как оптическую, так и радиолокационную), а также воздушное лазерное сканирование, характеризующееся, с одной стороны, максимально высокой точностью, а с другой – достаточно высокой стоимостью. Кроме того, существует метод получения ЦМР по одиночным космическим изображениям или аэрофотоснимкам. Применяется оцифровка существующих топографических карт с последующим получением ЦМР в соответствующем программном обеспечении.

В данной статье авторы предлагают подробнее рассмотреть технологию получения ЦМР на основе метода радиолокационной интерферометрии. Очевидными преимуществами получения модели современного рельефа на основе радиолокационных данных являются:

- всепогодность радиолокационной съемки (нет зависимости от облачности и времени суток в отличие от оптической стереосъемки);

- относительно низкая стоимость и широкая полоса захвата по сравнению с аэросъемкой и воздушным лазерным сканированием;
- минимальные трудозатраты при обработке данных космической съемки по сравнению со стереоскопической обработкой (процесс получения рельефа в программном модуле SARscape ПК ENVI практически полностью автоматизирован);
- в случае использования данных радиолокатора PALSAR с космического аппарата (КА) ALOS с гарантированной субпиксельной точностью геопозиционирования возможно построение ЦМР без наземных контрольных точек, либо с их минимальным количеством;
- высокая точность и детальность получаемых результатов (в частности, по экспертной оценке авторов, для данных ALOS PALSAR результирующий рельеф близок рельефу топографической карты масштаба 1:25 000 при размере одной сцены порядка 70x70 км).

Кроме перечисленных преимуществ, обработка технологии получения ЦМР интерферометрическим методом представляет интерес в связи с планируемым запуском группировки космических аппаратов ДЗЗ ОАО «Газком», среди которых будут КА с радиолокаторами.

В головном научно-исследовательском институте ОАО «Газпром» – ООО «ВНИИГАЗ» – проводится полномасштабный анализ потенциала радиолокационных данных для решения различных задач нефтегазовой отрасли (мониторинг смещений земной поверхности, получение ЦМР, обнаружение нефтяных пятен в акваториях, дешифрирование геологических структур и т. д.).

В настоящее время авторами выполняется мониторинг смещений земной поверхности на Заполярном газоконденсатонефтяном месторождении дифференциальным интерферометрическим методом по радиолокационным данным. Для такого мониторинга необходима многопроходная цепочка радиолокационных космических снимков и опорный входной рельеф. Для получения опорного рельефа был также выбран интерферометрический метод (но по другим исходным космическим снимкам), исходя из следующих соображений.

Чем выше точность опорного рельефа по высоте, тем увереннее определяются смещения и отфильтровываются фазовые помехи. Для максимально корректного разделения фазы опорного рельефа и фазы смещений земной поверхности необходима цифровая модель местности (ЦММ), по состоянию наиболее близкая по времени данным, используемым для интерферометрической обработки, поскольку в таком случае выделение высотной составляющей фазы будет более точным. В связи с этим ЦМР, построенная по результатам оцифровки топографических карт, не была бы лучшим решением. С другой стороны, район Заполярного месторождения расположен севернее 60° северной широты, и, следовательно, ЦММ, полученная по результатам радарной топографической съемки SRTM (Shuttle radar topographic mission), для этого района недоступна (и, в целом, ее пространственное разрешение, равное 90 м, недостаточно при использовании в качестве опорного рельефа для отслеживания смещений). ЦМР GTOPO-30 (пространственное разрешение 1 км) также совершенно не подходит для решения поставленной задачи.

Таблица 1

Радиодиапазоны современных космических радиолокационных комплексов

Диапазон	Частота, ГГц	Длина волны, см	Космические аппараты с радиолокационными комплексами
X	5,20-10,90	2,75-5,77 (2,4-3,8)	USGS SLAR, TerraSAR-X, Cosmo-SkyMed
C	3,9-6,2	3,8-7,6	ERS-1,2, ENVISAT-ASAR, RADARSAT-1, RADARSAT-2
L	0,39-1,55	19,3-76,9 (15-30)	SIR-A, SIR-B, ALOS
P	0,225-0,391	40,0-76,9 (30-100)	AIRSAR

Таким образом, получение опорного рельефа высокого пространственного разрешения интерферометрическим методом для данной ситуации было безальтернативным. Следующей проблемой стал выбор исходных данных.

ВЫБОР ИСХОДНЫХ ДАННЫХ

Космические аппараты, находящиеся в настоящее время на орбите, ведут радиолокационную съемку земной поверхности в различных диапазонах радиоволновой области электромагнитного спектра (см. таблицу 1). Наиболее доступными являются архивные радиолокационные изображения с этих КА.

На основе накопленного опыта интерферометрической обработки значительных объемов архивных радиолокационных космических снимков, авторами сделан вывод о наличии двух вариантов набора исходных данных при построении рельефа интерферометрическим методом для условий большей части территории Российской Федерации.

Первый вариант – использование результатов тандемной съемки с небольшой временной базой (например, архив снимков, сделанных спутниками ERS-1 и ERS-2). Положительными факторами являются следующие: идеальная интерферограмма в большинстве случаев; высокая когерентность; пространственное разрешение 20-25 м, что приблизительно в 4 раза выше, чем у ЦМР SRTM. Минусами этого варианта являются: неполное покрытие территории РФ радиолокационными изображениями; отсутствие свежих архивных данных (в том случае, если необходима современная ЦМР); резкое падение когерентности в районе лесных массивов, характерное в целом для С-диапазона радиоволновой области электромагнитного спектра.

Второй вариант – использование результатов радиолокационной съемки со спутника ALOS (бортовым радиолокатором с синтезированной апертурой PALSAR). Основным плюсом использования этих данных для получения информации о рельефе земной поверхности представляется длина зондирующей волны этого радиолокатора – 23 см, соответствующая L-диапазону. Соответственно, в большинстве случаев снимается проблема временной декорреляции интерферометрических пар радиолокационных снимков, вызванной влиянием растительнос-

ти. В связи с этим интерферометрические пары изображений ALOS PALSAR характеризуются высокой когерентностью, даже несмотря на то, что минимально возможный временной интервал между ними составляет 46 дней. При этом режим съемки PLR (полная поляризация излучения) позволяет дополнительно повысить когерентность и оптимизировать интерферограмму за счет съемки с полной поляризационной матрицей. В свою очередь, данные ALOS PALSAR FBS (однополяризационный режим съемки) характеризуются высоким пространственным разрешением – 7 м, что в 3-4 раза превышает разрешение данных тандемной съемки с ERS-1 и ERS-2.

В связи с отсутствием в настоящее время на орбите тандемов КА с радиолокационными комплексами, современная ЦМР не может быть получена с помощью первого рассматриваемого варианта. Таким образом, авторами был выбран второй вариант, а именно: получение рельефа с помощью интерферометрической обработки пары изображений ALOS PALSAR.

ПОИСК АРХИВНЫХ РАДИОЛОКАЦИОННЫХ ДАННЫХ ALOS PALSAR

Подбор архивных данных с учетом характеристик, необходимых для обеспечения результатов работ, был выполнен официальным российским дистрибьютором данных с КА ALOS – компанией «Совзонд». На исследуемый участок земной поверхности – район месторождения Заполярное (многоугольник красного цвета на рис. 1) – было найдено несколько комплектов радио-



Рис. 1. Схема покрытия района Заполярного месторождения радиолокационными данными ALOS PALSAR

локационных данных, подходящих для интерферометрической обработки. Два перекрывающихся прохода от 18.07.2007 г. и от 02.09.2007 г. были сделаны в режиме FBD (двойная поляризация), а два перекрывающихся прохода от 09.06.2006 г. и от 25.07.2006 г. – в режиме FBS (одинарная поляризация).

Отметим, что радиолокационные данные, полученные в режиме FBD, покрывают район месторождения на 80% двумя интерферометрическими парами изображений, в то время как одна пара изображений в режиме FBS полностью покрывает район месторождения и, кроме того, характеризуется более высоким пространственным разрешением (7 м). Радиолокационные данные ALOS PALSAR PLR (полная поляризационная матрица) также присутствуют в архиве на рассматриваемый участок, но они отсняты в весенний период (по опыту авторов не самый благоприятный для этой территории).

В итоге для построения рельефа была выбрана интерферометрическая пара изображений от 09.06.2006 г. и 25.07.2006 г., сделанных в режиме FBS (одинарная поляризация HH).

ПОЛУЧЕНИЕ РЕЛЬЕФА ИНТЕРФЕРОМЕТРИЧЕСКИМ МЕТОДОМ

Коротко остановимся на теоретических основах получения рельефа интерферометрическим методом. Входными данными для построения рельефа этим методом является пара (или цепочка) радиолокационных снимков земной поверхности, которая образует интерферометрическую пару. Ограничением для получения интерферометрической пары, а следовательно, возможности интерферометрической обработки пары (или цепочки) радиолокационных снимков, являются пространственная и временная базы.

Пространственная база (или базовая линия B на рис. 2) представляет собой расстояние между орбитальными положениями радиолокатора 1 и радиолокатора 2 при получении изображений, образующих интерферометрическую пару. Качество результатов интерферометрической обработки (т. е., в данном случае, качество результирующей цифровой модели рельефа) напрямую зависит от величины базовой линии и, в общем случае, возрастает с ее увеличением. Но при превышении некоторого критического значения длины пространственной базы интерферометрическая обработка становится невозможной, вследствие пространственной декорреляции.

Временной базой называют промежуток времени, прошедший между временем получения изображений радиолокаторами 1 и 2 (рис. 2). Понятие временной базы напрямую связано с такой важной проблемой как временная декорреляция, возникающей за счет изменений рельефа, растительности, влажности и т. д., произошедших в период между съемками первым и вторым радиолокаторами. В общем случае, эффект временной декорреляции становится менее заметен с увеличением длины зондирующей радиолокационной волны.

Каждое радиолокационное изображение интерферометрической пары (или цепочки) содержит амплитудный и фазовый слой. Амплитудный слой более пригоден для визуального анализа. Результирующая фаза Φ , полученная в ходе интерферометрической обработки фазовых слоев изображений интерферометрической пары, состоит из следующих компонентов:

$$\Phi = \Phi_{\text{topo}} + \Phi_{\text{def}} + \Phi_{\text{atm}} + \Phi_{\text{n}},$$

где Φ_{topo} – фазовый набег за счет обзора топографии под двумя разными углами;



Рис. 2.
Пространственное положение радиолокаторов, изображения с которых образуют интерферометрическую пару

Φ_{def} – фазовый набег за счет смещения поверхности в период между съемками;

Φ_{atm} – фазовый набег за счет различия длин оптических путей из-за преломления в среде распространения сигнала;

Φ_n – вариации фазы в результате электромагнитного шума.

Непосредственно интерферометрическая обработка пары радиолокационных изображений с целью получения ЦМР в общем случае состоит из нескольких базовых шагов:

1. Совмещение основного и вспомогательного радиолокационных изображений интерферометрической пары (в автоматическом режиме либо с ручным вводом контрольных точек).

2. Генерация интерферограммы, являющейся результатом комплексного поэлементного перемножения основного изображения и изображения, комплексно сопряженного к вспомогательному.

3. Разделение компонентов фазы Φ_{topo} и Φ_{def} за счет синтеза фазы рельефа.

4. Фильтрация интерферограммы, позволяющая в определенной степени уменьшить фазовый шум (помехи) за счет закругления выходной ЦМР.

5. Получение файла когерентности для области перекрытия двух снимков, составляющих интерферометрическую пару, в значениях от 0 до 1 для каждой пары соответствующих друг другу пикселей.

6. Развертка фазы (процедура перехода от относительных значений фазы к абсолютным).

7. Коррекция базовой линии.

8. Преобразование абсолютных значений фазы в относительные либо абсолютные высотные отметки в метрах, с получением на выходе ЦМР.

ПРАКТИЧЕСКАЯ РЕАЛИЗАЦИЯ (ПРОГРАММНЫЕ РЕШЕНИЯ)

На основе изучения мирового рынка программного обеспечения для интерферометрической обработки радиолокационных изображений был выбран специализированный программный комплекс SARscape (SARMAP, Швейцария), распространяемый в качестве дополнительного модуля к программному комплексу ENVI (ITT Visual Solutions, США). Эксклюзивным дистрибьютором обоих программных комплексов на территории Российской Феде-

рации и стран СНГ является компания «Совзонд». ООО «ВНИИГАЗ» использует эти программные комплексы в работе с 2007 г. ПК SARscape позволяет проводить полную комплексную обработку материалов радиолокационной съемки. В нем реализованы наиболее современные алгоритмы обработки и поддержка всех видов радиолокационных данных, доступных пользователям в настоящее время.

Рассмотрим практическую реализацию интерферометрической обработки пары радиолокационных снимков для получения ЦМР, теоретические основы которой приведены в первой части статьи. Процесс обработки снимков в программном комплексе SARscape включает следующие последовательные шаги.

1. Совмещение основного и вспомогательного радиолокационных изображений интерферометрической пары радиолокационных снимков с помощью двухэтапного автоматизированного алгоритма (первый этап включает совмещение на пиксельном уровне, второй – на субпиксельном) с последующим расчетом интерферограммы и заданием параметров некогерентного накопления.

2. Разделение компонентов фазы Φ_{topo} и Φ_{def} на основе синтеза фазы рельефа (с помощью имеющейся более грубой ЦМР, набора наземных контрольных точек с известными абсолютными высотами либо, в случае отсутствия таких данных, с помощью модели эллипсоида) и последующего ее вычитания из общей фазы с получением на выходе так называемой дифференциальной интерферограммы.

3. Фильтрация интерферограммы (усредняющим либо адаптивными фильтрами), позволяющая в определенной степени уменьшить фазовый шум за счет закругления выходной ЦМР (процесс фильтрации выполняется одновременно с получением файла когерентности для области перекрытия двух снимков, составляющих интерферометрическую пару).

4. Развертка фазы (процедура перехода от относительных значений фазы к абсолютным) по алгоритму растущей области с отсечением по порогу когерентности.

5. Коррекция базовой линии с помощью наземных контрольных точек либо специальным адаптивным алгоритмом на основе сопоставления развернутой фазы, фильтрованной интерферограммы, карты когерентности и уже имеющейся более грубой ЦМР.

6. Преобразование абсолютных значений фазы в относительные либо абсолютные высотные отметки в метрах с получением на выходе ЦМР.



Рис. 3.
Интерферограмма, рассчитанная по паре снимков ALOS PALSAR от 09.06.2006 г. и 25.07.2006 г. на район Заполярного месторождения

Таким образом, восемь теоретических шагов, необходимых для получения ЦМР интерферометрическим методом, полностью реализованы шестью практическими шагами, выполняемыми пользователем в ПК SARscape (первый и второй, а также четвертый и пятый теоретические шаги выполняются в рамках первого и третьего практических шагов, соответственно).

ПОЛУЧЕНИЕ ЦМР ИНТЕРФЕРОМЕТРИЧЕСКИМ МЕТОДОМ НА ПРИМЕРЕ ЗАПОЛЯРНОГО МЕСТОРОЖДЕНИЯ

Рассмотрим пример получения ЦМР интерферометрическим методом по паре снимков Заполярного месторождения, сделанных аппаратурой ALOS PALSAR 09.06.2006 г. и 25.07.2006 г.

В качестве исходных данных были использованы два вышеуказанных снимка ALOS PALSAR уровня обработки 1.0 («сырые» данные). Приведение «сырых» данных к виду Single Look Complex (называемому фокусировкой изображения) было выполнено в дополнительном модуле SARscape Focusing module программного комплекса SARscape.

Сфокусированные таким образом снимки были успешно совмещены в полуавтоматическом режиме (необходимые параметры процесса автоматического совмещения задаются пользователем), а затем была рассчитана интерферограмм-

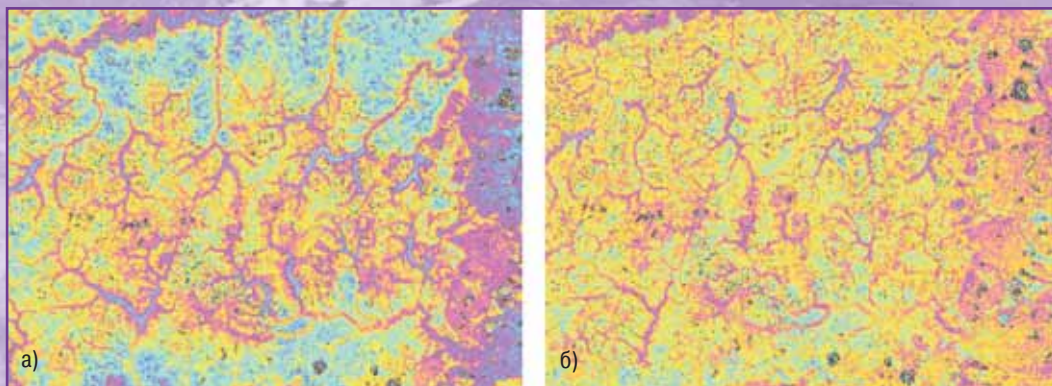


Рис. 4.
Дифференциальная интерферограмма, полученная путем вычитания из интерферограммы фазы опорного рельефа, синтезированной с помощью топографической карты масштаба: а) 1:500 000; б) 1:100 000

ма (рис. 3). Следует отметить высокое качество интерферограммы, так как наблюдаются непрерывные интерферометрические полосы. Зашумленная область в правом верхнем углу интерферограммы соответствует водной поверхности реки Таз.

Для выделения топографической компоненты фазы из интерферограммы были использованы две более грубые ЦМР, имеющиеся на район исследований. ЦМР-500 и ЦМР-100 были получены путем оцифровки горизонталей и высотных отметок топографических карт масштабов 1:500 000 и 1:100 000, соответственно. На рис. 4 представлены дифференциальные интерферограммы на фрагмент участка исследований, прошедшие процедуру незначительной адаптивной фильтрации. Как и следовало ожидать, топографическая компонента более полно исключена из дифференциальной интерферограммы, полученной с использованием ЦМР-100 (рис. 4б). На дифференциальной интерферограмме, полученной с помощью ЦМР-500, топографическая компонента все еще довольно ярко выражена (рис. 4а).

Следует отметить, что перпендикулярная составляющая базовой линии для рассматриваемой пары снимков составляет 2006 м. При таком значении базовой линии топографическая компонента выражена довольно сильно и, чтобы извлечь ее полностью, даже топографической карты масштаба 1:100 000 оказалось недостаточно. А в целом, для получения рельефа интерферометрическим методом по радиолокационным изображениям в L-диапазоне необходимы базовые линии примерно на порядок большие, чем для радиолокационных изображений в С-диапазоне. Так, если для радиолокаторов С-диапазона (ERS-1 и 2, ENVISAT, RADARSAT-1) приемлемы для получения рельефа являются перпендикулярные базы в первые сотни метров, то для радиолокаторов L-диапазона (ALOS PALSAR) таковыми являются базы в первые тысячи метров.

Критическая перпендикулярная базовая линия, составляющая для радиолокаторов С-диапазона порядка 1 км, для радиолокаторов L-диапазона также увеличивается и составляет в рассматриваемом случае 20 км. Поясним эту зависимость следующей формулой:

$$B_{n,cr} = \lambda R \tan(\theta) / 2Rr,$$

где $B_{n,cr}$ – критическая базовая линия;
 λ – длина зондирующей волны радиолокатора;
 Rr – пространственное разрешение в направлении наклонной дальности;
 R – дальность (путь зондирующей волны);
 θ – угол между дальностью и высотой.

Бортовой радиолокатор L-диапазона на КА ALOS характеризуется большей длиной зондирующей волны, более высоким пространственным разрешением в направлении наклонной дальности, большими значениями углов между дальностью и высотой и, наконец, большим значением пути зондирующей волны. Соответственно, для спутника ALOS каждый из аргументов в приведенной выше формуле влияет на величину критической перпендикулярной базовой линии в сторону ее увеличения. В связи с этим, диапазон приемлемых базовых линий в случае анализа данных ALOS PALSAR значительно расширяется.

На рис. 5 представлена построенная карта когерентности для рассматриваемой пары радиолокаци-



Рис. 5.
 Карта когерентности, рассчитанная по паре снимков ALOS PALSAR от 09.06.2006 г. и 25.07.2006 г.

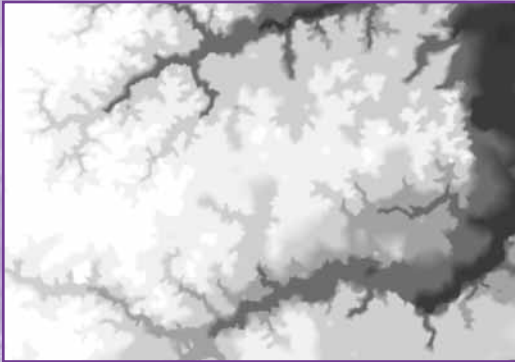


Рис. 6.
Фрагмент результирующей ЦМР, построенной по данным интерферометрической обработки пары снимков ALOS PALSAR от 09.06.2006 г. и 25.07.2006 г. и 25.07.2006 г.

онных снимков. Пиксели со значением когерентности выше 0,15 выделены красным цветом. Карта когерентности говорит о ее достаточно высоких значениях, несмотря на разницу в 46 дней между съемками в летний период. На практике это подтверждает теоретическую предпосылку о просвечивании растительности радиолучами L-диапазона. Отметим, что для интерферометрической пары снимков ENVISAT на эту же территорию и за приблизительно

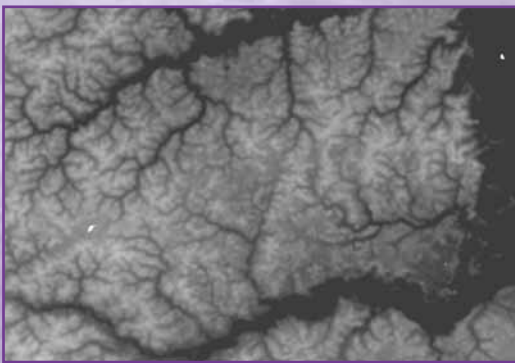


Рис. 7.
Фрагмент ЦМР, построенной по результатам оцифровки горизонталей и высотных отметок топографической карты масштаба 1:100 000

такой же период (35 дней) средняя когерентность ниже примерно в три раза.

Далее была развернута фаза, и выполнена коррекция базовой линии. Для коррекции использовались значения десяти наземных контрольных точек. Из них значения восьми точек были взяты с топографической карты масштаба 1:100 000, а значения двух точек определены по результатам наземных GPS-измерений. После коррекции базовой линии, была построена результирующая ЦМР, фрагмент которой представлен на рис. 6. При обработке в качестве опорного рельефа использовалась ЦМР, созданная по результатам оцифровки горизонталей и высотных отметок топографической карты масштаба 1:100 000 (рис. 7). Визуально видно, что детальность ЦМР, полученной по данным ALOS PALSAR FBS (рис. 6), значительно превосходит ЦМР, полученную по данным топографической карты масштаба 1:100 000 (рис. 7). По оценке авторов, результирующая ЦМР, построенная по радиолокационным снимкам ALOS PALSAR FBS, по информативности соответствует топографической карте масштаба 1:25 000.

Проверка точности результирующей ЦМР по высоте, построенной интерферометрическим методом, осуществлялась в программном комплексе ENVI. Для этого было выполнено вычитание из результирующей ЦМР опорного рельефа, созданного по данным топографической карты масштаба 1:100 000, и построена классифицированная карта погрешности по высоте результирующей ЦМР (рис. 8). На рис. 8 красным цветом показаны погрешности по высоте в пределах 5 м, зеленым – в пределах 10 м, синим – в пределах 20 м, а белым и черным – разрыв фазы. Как видно из данных, приведенных на рис. 8, около 70% высотных отметок по точности соответствуют требованиям, предъявляемым к топографическим картам масштаба 1:25 000. Систематическое ухудшение точности по высоте до точности, соответствующей требованиям, предъявляемым к топографическим картам масштаба 1:100 000, наблюдается в северо-западной части результирующей ЦМР. Это может быть связано с отсутствием опорных наземных точек в этом районе и, соответственно, не совсем правильными результатами коррекции базовой линии на этом участке.

В результате обработки на весь участок исследований (Заполярное месторождение) был получен рельеф, по точности соответствующий топографическим картам масштаба 1:25 000. В дальнейшем он был использован в качестве опорного для мониторинга смещений земной поверхности дифференциальным интерферометрическим методом, а также для моделирования современного напряженного состояния горных пород, изучения геодинамики и мерзлотных процессов.

В качестве примера приведем выявленный по результатам визуального анализа полученной ЦМР потенциально опасный для инфраструктуры месторождения объект – крупное выпучивание ледяного массива на месте бывшего термокарстового озера. Для наглядности это явление представлено на рис. 9 в виде трехмерного изображения участка местности с увеличенным вертикальным масштабом рельефа, полученного по результатам обработки интерферометрической пары снимков ALOS PALSAR от 09.06.2006 г. и 25.07.2006 г., и совмещенное с многозональным оптическим снимком среднего пространственного разрешения.

Таким образом, по результатам проведенных исследований можно сделать вывод о высоком качестве ЦМР, полученной интерферометрическим методом из пары радиолокационных снимков ALOS PALSAR FBS. По экспертной оценке, на 70% общей площади исследуемого участка она соответствует по точности топографической карте масштаба 1:25 000 (размер исследуемого участка 70x70 км). Это позволяет говорить о том, что интерферометрический метод применим для получения высокоточных ЦМР (соответствующих по точности картографическим материалам масштабов 1:25 000 и 1:50 000) на большие площади при небольших затратах и крайне незначительных объемах уже имеющейся топографической информации. Для равнинных областей, в крайнем случае, для синтеза топографической фазы можно даже использовать среднюю по снимку высоту.

Полученный рельеф может применяться как для дальнейших научных исследований, так и в проектировании застройки территорий (на этапе обоснования инвестиций), при обновлении планово-высотной основы топографических карт масштаба до

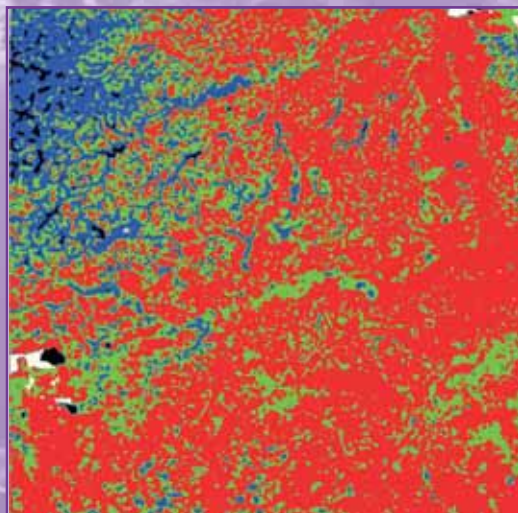


Рис. 8. Классифицированная карта погрешности по высоте результирующей ЦМР

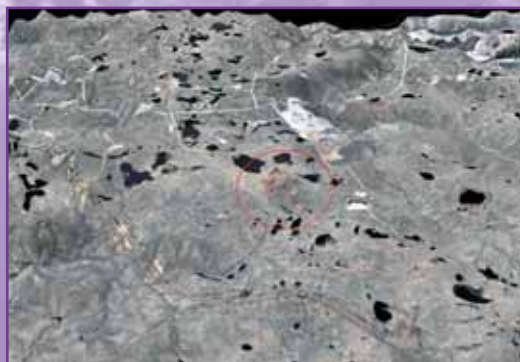


Рис. 9. Трехмерное изображение участка месторождения с крупным выпученным ледяным массивом

1:25 000 включительно. Необходим лишь правильный выбор исходных радиолокационных снимков, специализированное программное обеспечение, опытные квалифицированные операторы и незначительное количество геодезической информации в виде пространственных координат хорошо дешифрируемых точек местности.