

Оценка деформаций земной поверхности в районах интенсивной нефтедобычи Западной Сибири методом РСА интерферометрии по данным ENVISAT\ASAR и ALOS\PALSAR

А.В. Евтюшкин, А.В. Филатов

*Югорский НИИ информационных технологий (ЮНИИ ИТ)
628011, г. Ханты-Мансийск, ул. Мира, 151
E-mails: avy@uriit.ru, fav@uriit.ru*

Работа описывает применимость радиолокационных снимков спутников ENVISAT (С-диапазон, 5,6см) и ALOS (L-диапазон, 23см) для оценки деформаций земной поверхности нефтяных месторождений Западной Сибири. Проведен комплексный анализ зависимости временной и пространственной декорреляции интерферограмм от различных длин волн, условий и времени съемки. На основе анализа определены критерии выбора кадров для построения цифровых моделей рельефа (ЦМР) и карт смещений земной поверхности, позволяющие получить наиболее точные результаты. Разработан метод, позволяющий выделить смещения, причиной которых являются подвижки блоков земной коры в результате извлечения нефти. Приведен пример применения технологии радиолокационной интерферометрии для оценки деформаций поверхности Самотлорского месторождения с использованием результатов высокоточных измерений на Самотлорском геодинамическом полигоне за 2007-08 гг.

Ключевые слова: радиолокационная интерферометрия, ЦМР, смещения, геодинамический полигон, ENVISAT, ALOS.

Введение

Западная Сибирь основной источник нефти и природного газа среди регионов России. Здесь развернут огромный топливно-энергетический комплекс, состоящий из кустов скважин, промышленных сооружений, трубопроводов различного назначения. Разработка запасов ведется в зоне сплошной или очаговой вечной мерзлоты, торфяных болот, промерзающих полностью зимой мелководных озер, термокарстовых провинциях, районах развития овражной эрозии в результате техногенного нарушения почвенного покрова. Негативные геодинамические процессы вызывают разрывы труб на различных глубинах в скважинах на действующих нефтегазовых месторождениях, наземных внутрипромысловых и магистральных трубопроводах.

Для обеспечения геодинамической и экологической безопасности от влияния разработки недр на природную среду, промышленные и гражданские сооружения, попадающие в площадь горного отвода, проводятся работы по горно-экологическому мониторингу. Для решения таких задач на территории лицензионных участков создаются геодинамические полигоны, состоящие из множества глубинных реперов. На основе анализа и интерпретации результатов комплекса высокоточных геодезических измерений на пунктах геодинамического полигона строятся картосхемы формирующейся мульды оседания [1].

Проводимые работы по нивелировке, гравиметрии, GPS-измерениям, измерениям локального магнитного поля Земли требуют значительных финансовых и трудовых затрат. Для наблюдения за динамикой мульды оседания, образующейся в результате извлечения углеводородов, измерения необходимо проводить ежегодно, а для некоторых областей месторождения несколько раз в год. К тому же такой подход позволяет получать величины смещений лишь в точках установки реперов, что

зачастую недостаточно для получения целостной картины. Более того, в условиях непроходимой болотистой местности не всегда удается добраться до определенных пунктов для проведения замеров.

Эффективным методом, позволяющим получать площадные оценки вертикальных и плановых смещений дневной поверхности, является интерферометрическая обработка радиолокационной съемки с повторных орбит космического аппарата (КА). Преимуществом радиолокаторов с синтезированной апертурой антенны (РСА) является способность получать изображение зоны обзора независимо от условий освещенности и облачности, что особенно актуально для северных широт. Известно успешное применение интерферометрии для обнаружения просадок грунтов в районах угольных шахт в Англии, нефтяных полей в Калифорнии, крупных мегаполисах Европы, зон землетрясений и действующих вулканов. Другим не менее важным назначением данного метода является построение высокоточных цифровых моделей рельефа (ЦМР) в виде GRID-сетки с шагом до 5 м. Опорная ЦМР высокого разрешения необходима в процессе дифференциальной интерферометрической обработки для исключения влияния рельефа при расчете смещений. Как самостоятельный продукт, ЦМР используются для оценки площади загрязнения земель в результате разливов нефти из системы трубопроводного транспорта.

Применение РСА интерферометрии для территории Западной Сибири невозможно без дополнительных исследований и доработки метода. Сложности расчета высот и смещений в первую очередь связаны с географическими и геологическими особенностями территории и характером измеряемых подвижек. Из-за условий отражения зондирующего сигнала от ландшафтов характерных для данной местности не для всей территории удается получить устойчивые интерферограммы. Происходит временная декорреляция радиолокационных кадров даже при незначительном интервале между повторными съемками одной и той же территории. Сезонные изменения уровня болот, а также рост растительности оказывают маскирующее влияние и не позволяют точно определить смещения, связанные с движениями блоков земной коры.

Таким образом, основной целью данной работы является построение ЦМР и оценка деформаций земной поверхности в районах интенсивной нефтедобычи Западной Сибири.

Исходные данные

В настоящее время на орбите работают РСА, выполняющие съемку в различных диапазонах длин волн (X, C, L) с высоким пространственным разрешением (до 1 м, TerraSAR-X). Используются данные следующих сенсоров:

- ENVISAT\ASAR. Оператор – Европейское аэрокосмическое агентство (ESA). Длина волны 5,6см (C-диапазон), VV, HH, VH и HV поляризации, период повторной съемки 35 суток, пространственное разрешение для стандартного режима (Image Mode) 30м. Составлена 41 интерферометрическая пара из 57 кадров, полученных по гранту ESA кадров за период с 2003 по 2004 гг.

- ALOS\PALSAR. Оператор – Японское аэрокосмическое агентство (JAXA). Длина волны 23см (L-диапазон), VV, HH, VH и HV поляризации, период повторной съемки 46 суток, пространственное разрешение для режима одной поляризации (Fine Beam Single) 10м, для режима двойной поляризации (Fine Beam Dual) 10м. В рамках гранта JAXA получено 76 сцен за период с 2006 по 2008 гг.

В данной работе для проведения интерферометрических расчетов и анализа результатов использовано программное обеспечение ENVI с модулем SARscape и открытый программный пакет DORIS.

Интерферометрическая обработка

Для интерферометрической обработки используются 2 изображения, полученные радиолокатором при повторном пролете над одной и той же территорией. Каждый пиксел

РСА кадра представляет собой когерентную сумму отражений зондирующего сигнала от точечных целей, расположенных на поверхности в пределах элемента разрешения. Радиолокатор регистрирует принимаемый сигнал в комплексном виде, сохраняя фазу и амплитуду.

$$S = Ae^{j\varphi_0} e^{-j\frac{4\pi}{\lambda}r},$$

где A – амплитуда принимаемого сигнала, φ_0 – изменение фазы радиосигнала при отражении от цели (фаза переотражения), r – расстояние между антенной РСА и целью, λ – длина волны зондирующего излучения [2].

Интерферометрическая обработка основана на манипуляции с разностью фаз отраженных сигналов, в результате которой можно получить возвышение одного отражающего элемента поверхности относительно другого, из чего в дальнейшем построить ЦМР; а также обнаружить смещения, произошедшие за время между съемками. Составляющая φ_0 случайна для участка поверхности внутри элемента разрешения, но при вычислении разности фаз для каждой пары пикселей совмещенных радиолокационных кадров исключается. Однако при большом временном промежутке между повторными пролетами спутника могут произойти значительные изменения земного покрова и остаточная часть разности переотраженных фаз (φ_0) становится шумом на интерферограмме. В случае если расстояние между антенной РСА при повторных пролетах (базовая линия) слишком большое, переотраженная фаза не исключается, что также приводит к разрушению интерферограммы. Временная и пространственная декорреляция радиолокационных сигналов напрямую зависит от ландшафта и состояния земной поверхности и влияет на точность получаемых результатов.

Величина когерентности (от 0 до 1) отражает степень разрушения интерферограммы, вычисляется как корреляция двух сигналов в комплексном виде и является мерой пригодности пары снимков для дальнейшей обработки.

$$Coh = \frac{S_1 S_2^*}{\sqrt{S_1 S_1^* \cdot S_2 S_2^*}}$$

где S_1 и S_2 – комплексные значения отраженного сигнала для первого (master) и второго (slave) снимков.

На основе карт когерентности, рассчитанных для архива снимков ENVISAT\ASAR, выбрано 9 пар пригодных для интерферометрической обработки. Для РСА С-диапазона пригодной является съемка, выполненная в поздний весенний, летний и ранний осенний сезоны [3]. Максимальная временная база, при которой не происходит декорреляции интерферограммы, составляет 70 суток. Расстояние между РСА при повторных пролетах не должно превышать 600 м, иначе это приводит к разрушению интерферометрической фазы в виду пространственной декорреляции. Следует заметить, что критическое значение длины базовой линии для ENVISAT\ASAR в этом режиме съемки (угол обзора 23°, пространственное разрешение 30м) составляет 1,1 км [2].

Проведено сравнение когерентности между парами, полученными РСА ENVISAT\ASAR и ALOS\PALSAR, а также между парами ALOS\PALSAR при различных условиях съемки. Совмещение разных карт когерентности проведено на основе геопривязки с использованием орбитальных данных и параметров съемки. Сравнение показало, что за счет большей длины волны (23 см) и, как следствие, большего проникающего эффекта корреляция интерферометрических пар снимков ALOS\PALSAR значительно выше. Это подтверждается сравнением карт когерентности интерферометрических пар кадров на территорию Федоровского нефтяного месторождения, приведенных в табл. 1. Среднее значение когерентности пары снимков ALOS\PALSAR выше несмотря на пространственную декорреляцию в виду значительной длины базовой линии.

Таблица 1. Интерферометрические пары ENVISAT\ASAR и ALOS\PALSAR

Сенсор	Дата съемки (master)	Дата съемки (slave)	Базовая линия	Когерентность
ENVISAT\ASAR	10.07.2004	14.08.2004	60,481м	0,319
ALOS\PALSAR	12.06.2008	28.07.2008	2323,482м	0,451

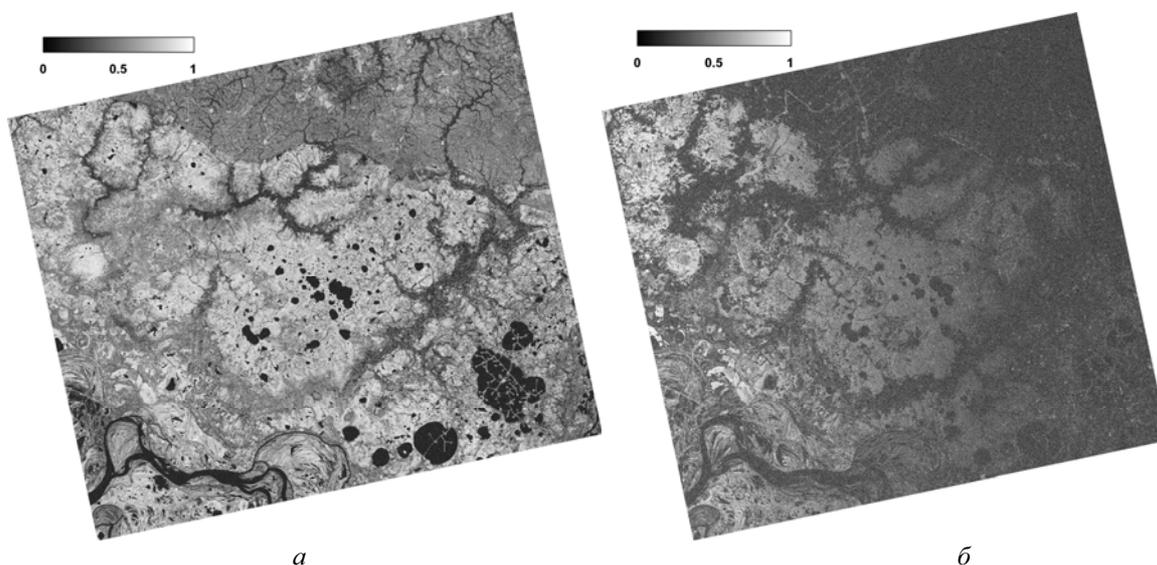


Рис. 1. Когерентность интерферометрических пар ALOS\PALSAR, выполненных 19.08.2007-04.10.2007 (а) и 06.07.2008-21.08.2008 (б)

Сравнение карт когерентности (табл. 2) пар кадров ALOS\PALSAR на территорию Самотлорского месторождения с разными пространственными базами, показало значительное разрушение фазы интерферограммы в виду пространственной декорреляции (рис. 1). В связи с этим не удастся построить ЦМР лесной территории, для которых используются пары с базовой линией более 3000 м [4].

Таблица 2. Интерферометрические пары ALOS\PALSAR с длинной и короткой пространственной базой

Сенсор	Дата съемки (master)	Дата съемки (slave)	Базовая линия	Когерентность
ALOS\PALSAR	19.08.2007	04.10.2007	418,729м	0,584
ALOS\PALSAR	06.07.2008	21.08.2008	3464,824м	0,251

Кроме того, у пары снимков с большей пространственной базой когерентность снижается при увеличении угла съемки (рис. 1б). Среднее значение в дальней зоне обзора на 0,134 меньше чем в ближней, поэтому точность расчета высоты рельефа падает при удалении от антенны РСА.

В отличие от снимков ENVISAT\ASAR для интерферометрических пар ALOS\PALSAR (табл. 3) при съемке снежной поверхности возможно получить устойчивую интерферограмму даже при временной базе до 1 года. Величины деформаций, полученные по результатам интерферометрической обработки зимней съемки, точнее отражают подвижки блоков земной в виду меньшего влияние сезонных изменений уровня торфяных болот.

Таблица 3. Интерферометрические пары ALOS\PALSAR при съемке снежной и бесснежной поверхности

<i>Сенсор</i>	<i>Дата съемки (master)</i>	<i>Дата съемки (slave)</i>	<i>Базовая линия</i>	<i>Когерентность</i>
ALOS\PALSAR	19.08.2007	04.10.2007	418,729м	0,533
ALOS\PALSAR	18.12.2007	02.02.2008	788,789м	0,471
ALOS\PALSAR	04.10.2007	06.07.2008	1954,121м	0,156
ALOS\PALSAR	30.01.2007	18.12.2007	2731,391м	0,266

Таким образом, применение сенсора с большей длиной волны (ALOS\PALSAR) исключает маскирующее влияние мелких растительных покровов и позволяет получить более устойчивые к временной декорреляции интерферограммы. Высокая точность ЦМР достигается при использовании интерферометрических пар снимков бесснежной территории с углом съемки от 36,6° до 38,7° (ближняя зона). Для оценки долговременных деформаций земной поверхности предпочтительнее использовать данные зимней съемки.

Оценка деформаций земной поверхности

В соответствии с программой «Комплексная система геодинамической безопасности в зоне деятельности ОАО «Самотлорнефтегаз» ЗАО НПП «Центром прикладной геодинамики» в 2001-2002 годах выполнены работы по созданию Самотлорского геодинамического полигона (СГДП). В 2008 году выполнен VI цикл комплекса геодезических измерений: нивелировка II класса повышенной точности, гравиметрия, GPS-наблюдения. Западно-Сибирским филиалом института нефтегазовой геологии и геофизики (ЗСФ ИНГГ СО РАН) на основе геодезических измерений на СГДП построена мульда оседания за период наблюдений с 2002 по 2008 годы [5].

В рамках гранта JAXA для покрытия территории Самотлорского месторождения заказаны 18 сцен, снятых в летний и осенний периоды 2007-2008 гг. Размер сцены составляет 70x70 км, поэтому 3 снимка полностью охватывают всю территорию месторождения и область вокруг него. Для привязки снимков, как в процессе построения рельефа, так и для расчета смещений использованы яркие точки, возникающие вследствие отражения радиолокационного сигнала от объектов нефтедобычи [3]. В октябре 2007 года в ходе подспутниковых экспериментов на Самотлорском месторождении авторами установлены координаты 17 точек, впоследствии детектированных на снимках.

По данным летней радиолокационной съемки 2008 г. с использованием значений нормальных высот нивелирных знаков за 2008 г. построена опорная цифровая модель рельефа высокого разрешения. Проведенное сравнение модели с изолиниями и отметками высот, оцифрованных с топографических карт масштаба 1:200000 выявило среднеквадратическое отклонение 5,331м [4]. Для построения карты смещений использованы данные повторной радиолокационной съемки с периодом 1 год с применением опорного рельефа. Расчет абсолютных значений деформаций проведен с использованием значений вертикальных смещений измеренных на пунктах полигона за 2007-08 гг. Погрешность определения смещений поверхности СГДП, рассчитанная на основе длины базовой линии и карты когерентности, составила в среднем 2 см.

На рис. 2 показаны расчетные вертикальные смещения на Самотлорском месторождении. Значительные пустые области, соответствующие густой растительности и водным объектам, вызваны разрушением интерферометрической фазы в виду низкой когерентности сигналов. Для сравнения и последующего совместного анализа карта вертикальных смещений совмещена с результатами геодезического мониторинга на Самотлорском геодинамическом полигоне. Нулевые значения изогипсы мульды оседания, построенные по материалам геодезического мониторинга на Самотлорском геодинамическом полигоне за 2007-08 гг., хорошо коррелирует с картой вертикальных смещений, полученных при обработке радиолокационной космосъемки.

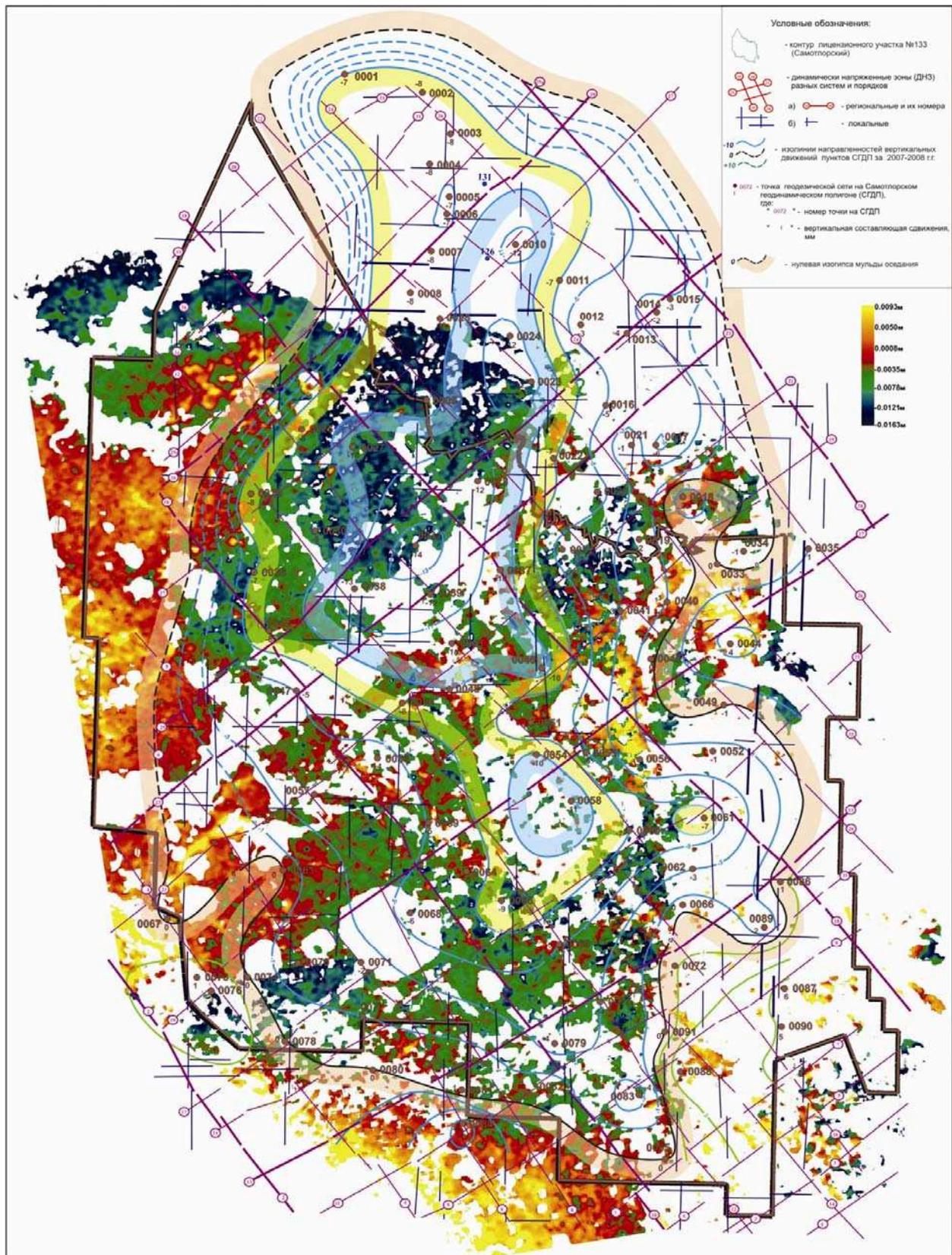


Рис. 2. Картосхема вертикальных смещений земной поверхности Самотлорского месторождения за 2007-08 гг. по результатам интерферометрической обработки ALOS/PALSAR с наложением мульды оседания, реперов геодинамического полигона и динамически напряженных зон

Пунктирная (предполагаемая) нулевая изогипса мульды оседания на участке точек 0067-0076 уточнена и скорректирована по данным радиолокационной космосъемки. Аналогичная ситуация по коррекции нулевой изогипсы стала возможной в зоне Усть-Вахской и Белозерной площадей, расположенных в восточной части картосхемы и севернее озера Самотлор. Центральная, наиболее прогнутая часть мульды оседания (просадки от -10 до -14 мм), построенной по данным геодезического мониторинга, полностью коррелирует с результатами радиолокационной космосъемки. При этом расхождения определения смещений двумя способами в центре мульды оседания не превышают 3мм. Северо-западная часть полигона не обеспечена точками наземных измерений и нулевая изогипса проведена пунктиром. По анализу вертикальных смещений земной поверхности, полученных по радиолокационным космоснимкам, она может быть смещена на запад [5].

Таким образом, применение метода двухпроходной дифференциальной интерферометрии позволяет получить площадное представление о смещениях земной поверхности, происходящих на территории разрабатываемых нефтяных месторождений. При дополнительном использовании значений смещений, измеренных высокоточными методами на пунктах геодинимических полигонов, возможно построить карту деформации в абсолютных величинах. Результаты радиолокационной интерферометрии позволяют дополнить, уточнить и скорректировать картосхемы, полученные на основе геодезических измерений на геодинимических полигонах.

Работы проводятся при поддержке проектов 07/JAXA/ASP No. 0704001 и ESA ENVISAT-AO ID 635, Category-1 ID 3166.

Литература

1. *Васильев Ю.В., Мартынов О.С., Радченко А.В., Казанцев Ю.П.* Анализ результатов исследований на геодинимическом полигоне Самотлорского месторождения // Пути реализации нефтегазового потенциала ХМАО. Ханты-Мансийск: ИздатНаукаСервис, 2005. Т.1. С.452-461.
2. *Rosen, P.A.; Hensley, S.; Joughin, I.R.; Li, F.K.; Madsen, S.N.; Rodriguez, E.; Goldstein, R.M.* Synthetic aperture radar interferometry // Proceeding of IEEE, 2000. Vol.88. No. 3. P.333-380.
3. *Евтюшкин А.В., Филатов А.В.* Мониторинг сезонных деформаций земной поверхности методом радарной интерферометрии по данным ENVISAT\ASAR и ALOS\PALSAR // Материалы IV Научно-практической конференции «Обратные задачи и информационные технологии рационального природопользования». 22-23 апреля 2008г. Ханты-Мансийск. Полиграфист, 2008. С.195-201.
4. *Евтюшкин А.В., Филатов А.В.* Технология построения цифровых моделей рельефа и оценки смещений методом радарной интерферометрии // Вестн. Новосиб. гос.ун-та. Серия: Информационные технологии, 2009. Т.7. Вып. 1 (в печати)
5. Горно-экологический мониторинг на территории горного отвода Самотлорского месторождения нефти с учетом анализа выполненных работ при заложении наблюдательной геодезической сети. Отчет за годовой цикл 2008 года / Отчет по НИР. ЗСФ ИНГГ СО РАН. - Тюмень. 2009. 177 с.

Estimation of Earth surface displacements in area of intensive oil production in Western Siberia by SAR interferometry using ENVISAT\ASAR and ALOS\PALSAR data

A.V. Yevtyushkin, A.V. Filatov

Ugra Research Institute of Information Technologies (URIIT)
628011, Khanty-Mansiysk, Mira St., 151
E-mails: avy@uriit.ru, fav@uriit.ru

Paper describes applicability of radar data from ENVISAT (C-band, 5.6cm) and ALOS (L-band, 23cm) satellites for estimation of Earth surface deformations of oil wells in Western Siberia. Complex analysis of temporal and spatial decorrelation depending on different wavelengths, condition and time of acquire is done. Criteria of scene selection for digital elevation models (DEM) and displacement maps construction are defined based on analysis and allowing getting precise results. Method allowing detecting displacements, caused by Earth crust blocks movements as a result of oil extraction is developed. Example of radar interferometry application for estimation of deformations of Samotlorskoe oil well surface using results of precise leveling on Samotlorskiy geodynamic polygon during 2007-08 is given.

Keywords: radar interferometry, DEM, displacements, geodynamic polygon, ENVISAT, ALOS.