

Многолетний геодинамический мониторинг нефтегазовых месторождений Западной Сибири методом спутниковой радиолокационной интерферометрии

А.В. Филатов¹, А.В. Евтушкун¹, Ю.В. Васильев²

¹Балтийский федеральный университет им. И. Канта,
236041 Калининград, ул. А.Невского, 14

E-mails: AnFilatov@kantiana.ru;
AYevtyushkin@kantiana.ru

²Западно-Сибирский филиал

Института нефтегазовой геологии и геофизики им. А.А. Трофимука СО РАН,
625670 Тюмень, ул. Володарского, 56

E-mail: radan92@list.ru

В работе представлены результаты интерферометрической обработки серии многолетних данных сенсора ALOS\PALSAR. Для исследования просадок земной поверхности выбраны территории Губкинского газоконденсатного и Самотлорского нефтяного месторождений, на которых функционируют геодинамические полигоны для контроля мульд оседания. Рассматриваются особенности расчета опорной цифровой модели рельефа и карт смещений. Предложен подход для расчета площадных картосхем постоянных скоростей смещений на малых временных интервалах.

Ключевые слова: радиолокационная интерферометрия, геодинамический полигон, просадки, ALOS, PALSAR.

Введение

Высокие темпы освоения Губкинского нефтегазоконденсатного месторождения расположенного в ЯНАО создали острую необходимость объективной оценки общего состояния геологической среды и объектов нефтегазодобычи. Для этой оценки используются данные комплексного мониторинга на геодинамическом полигоне в пределах границ горного отвода, где находятся основные технологические и социально-бытовые объекты.

Основные причины формирования возможных деформаций дневной поверхности, фундаментов промышленных объектов и оснований технологических коммуникаций, имеют свои характерные признаки, которые необходимо отслеживать на созданном геодинамическом полигоне. Условно их можно подразделить на три группы:

- причины, связанные с естественной геодинамикой недр, обусловленной природными, глубинными процессами;
- причины, связанные с процессами интенсивной и долговременной разработкой Губкинского месторождения с нарушением технологических процессов;
- причины, связанные с качеством строительства и эксплуатацией зданий и сооружений.

Губкинский геодинамический полигон (ГГДП) был спроектирован и построен Сибирской государственной геодезической академией в 2000–2001 годах. Закладка центров выполнена методом бурения. Глубина промерзания грунтов на участке работ была принята – 2 м. Исходя из этого, глубина закладки реперов была принята – 4 м.

Главной особенностью структурной модели Губкинского месторождения является его тектоническая неоднородность – разломно-блочное строение геологической среды, которое отображается на карт-материалах и в конфигурации мульды сдвижения, а также подтверждается количественными показателями пунктов наблюдений геодинамического полигона. Это разно-векторные значения горизонтальных и вертикальных смещений, полученные высокоточными геодезическими измерениями. Они подтверждают природу и «жизнь» каждого

из блоков, как в части динамики амплитуд вертикальных подвижек, так и в части дифференцированного напряженно-деформационного состояния недр.

Основой анализа геодинамики является схема динамически напряженных зон, выполненная по технологии построения моделей разломно-блочного строения нефтяных месторождений. На площадь ГГДП построена схема линеаментов и проведен линеаментный анализ. Зоны пересечения линеаментов сформировали 42 блока. Наложение мульды сдвижения на схему блоков позволило получить мульду сдвижения в блочном варианте (рис. 1). Анализ длинных осей блоков выявил хорошую их корреляцию с ориентировкой длинных осей мульды сдвижения, что указывает на участие напряженно-деформационных процессов в формировании мульды (Геодинамический мониторинг., 2008).

Впервые на исследуемой территории применен метод космической радарной интерферометрии для оценки деформаций земной поверхности от падения пластового давления при длительной добыче газа. Данный метод позволяет дистанционно отслеживать величины вертикальных подвижек земной поверхности в течение различных временных интервалов – от минимального периода повторных съемок до нескольких лет. Для спутника ALOS период повторного пролета составлял 46 суток. Это дает возможность с высокой точностью разделить участие природных и техногенных процессов в формировании мульды сдвижения, а также на основании расчетных интерферометрических данных показать годовое изменение формы мульды оседания (Васильев и др., 2010).

Совершенствование метода спутниковой радарной интерферометрии позволяет получать плановые оценки высот с точностью до первых метров и смещений с точностью до первых сантиметров. Единственным ограничением, которое вносит значительную ошибку в результат обработки, является пространственная и временная декорреляция, что для территории Западной Сибири обусловлено особенностью ландшафтного строения и быстрыми изменениями маскирующего растительного покрова (Filatov, Yevtyushkin, 2010). Накопление достаточного объема повторных съемок радара PALSAR, успешно функционирующего на орбите в 2006-2011 гг, позволило применить метод интерферометрии устойчивых отражателей PSI – Persistent Scatterers Interferometry на регион нефтедобычи с большим числом точечных техногенных объектов (Филатов и др., 2011). Известны примеры успешного многовременного мониторинга просадок земной поверхности при активных техногенных разработках на значительных глубинах методом радарной интерферометрии (Hoffmann, 2003; Ferretti, 2007; Strozzi, 2011).

Особенности интерферометрической обработки

Интерферометрическая обработка обеспечивает высокую точность определения высот и смещений за счет использования фазовой компоненты радиолокационных сигналов. Алгоритм расчета предусматривает формирование интерферометрических пар кадров с целью минимизации геометрической и временной декорреляции, выбор на амплитудных изображениях пикселов, соответствующих постоянным отражателям, расчет атмосферно фазового сдвига, скорости смещений и высот.

Путем поэлементного перемножения двух комплексных радиолокационных изображений получается интерферограмма, состоящая из множества полос равной разности фаз:

$$I = S_1 \cdot S_2^* = A_1 e^{j\varphi_1} \cdot A_2 e^{-j\varphi_2} = A_1 A_2 \cdot e^{j(\varphi_1 - \varphi_2)} = A_1 A_2 \cdot e^{j\Phi}, \quad (1)$$

где I – комплексная интерферограмма, S_1 – комплексный сигнал, принятый при первом пролете, S_2^* – комплексно-сопряженный сигналу, принятому при повторной съемке, A_1 , A_2 – амплитуды сигналов, φ_1 , φ_2 – фазы сигналов, Φ – результирующая (интерферометрическая) фаза.

Исходя из геометрии интерферометрической съемки, разность разновременных радиолокационных сигналов зависит от высоты отражающей поверхности и смещения произошедшего за время между съемками в соответствии со следующей формулой:

$$\Phi = \frac{4\pi}{\lambda} B \sin(\theta_p^0 - \alpha) - \frac{4\pi}{\lambda} \frac{B_{\perp,p}^0}{R_{l,p} \sin \theta_p^0} H_p - \frac{4\pi}{\lambda} D_p , \quad (2)$$

где λ – длина волны зондирующего излучения, B – расстояние между антенной радиолокатора при разновременной съемке (пространственная база), θ_p^0 – угол обзора земной поверхности, рассчитанный для опорной поверхности, α – угол наклона базовой линии, $B_{\perp,p}^0$ – перпендикулярная составляющая базовой линии, рассчитанная для опорной поверхности, $R_{l,p}$ – расстояние между антенной при первом пролете и точкой на опорной поверхности, H_p – высота отражающей поверхности над опорной, D_p – смещение отражающей поверхности за время между съемками (Ferretti, 2007).

Вследствие некоррелируемого шума, возникающего в результате множественных переотражений от поверхности, интерферометрическая фаза является случайной величиной, распределенной по закону Гаусса. Математическое ожидание интерферометрической фазы представлено формулой (2). Дисперсия зависит от величины когерентности разновременных радиолокационных сигналов, которая принимает значения в интервале от 0 до 1 и является параметром качества результатов интерферометрической обработки. Основными факторами, влияющими на когерентность являются пространственная и временная декорреляция. На основе формулы (2) и значения дисперсии интерферометрической фазы рассчитываются погрешности определения высот и смещений земной поверхности в соответствии со следующими формулами:

$$\sigma_z = \sigma_\phi \frac{R \lambda \sin \theta}{4\pi B_\perp} \quad (3)$$

$$\sigma_D = \sigma_\phi \frac{\lambda}{4\pi} \quad (4)$$

где σ_z – погрешность определения высоты, σ_D – погрешность определения смещений, σ_ϕ – дисперсия интерферометрической фазы, R – расстояние от антенны до точки на земной поверхности.

Как видно из формул (3) и (4) интерферометрическая фаза более чувствительна к смещениям, чем к перепадам высот рельефа. При этом для построения цифровых моделей рельефа подбирают интерферометрические пары кадров с большей перпендикулярной пространственной базой, но не превосходящей критического значения. Для расчета смещений дифференциальную пару кадров подбирают по возможности с меньшей перпендикулярной пространственной базой, чтобы минимизировать влияние рельефа.

Для многолетнего мониторинга Губкинского нефтегазоконденсатного месторождения использовались радиолокационные снимки сенсора PALSAR, установленного на космическом аппарате ALOS. Площадь покрытия радиолокационного кадра составляет 70x70 км, что позволяет охватывать одним снимком всю территорию ГГДП и Губкинского лицензионного участка, разрабатываемого ЗАО «Пургаз». В таб. 1 приведены составленные интерферометрические пары и их применение в процессе обработки. Назначение исходных кадров определено в соответствии с параметрами съемки и длиной базовой линии.

Таблица 1. Пары кадров PALSAR на Губкинское месторождение за 2007-2011 гг.

Master – снимок		Slave – снимок		Длина базовой линии, м
Идентификатор	Дата	Идентификатор	Дата	
Построение опорной цифровой модели рельефа				
ALPSRP107161290	28.01.2008	ALPSRP154131290	15.12.2008	5464
ALPSRP154131290	15.12.2008	ALPSRP221231290	20.03.2010	4713
Расчет вертикальных смещений земной поверхности				
ALPSRP053481290	25.01.2007	ALPSRP100451290	13.12.2007	3194
ALPSRP053481290	25.01.2007	ALPSRP154131290	15.12.2008	1662
ALPSRP051731290	13.01.2007	ALPSRP165801290	05.03.2009	189
ALPSRP080321290	28.07.2007	ALPSRP187681290	02.08.2009	1843
ALPSRP100451290	13.12.2007	ALPSRP221231290	20.03.2010	137
ALPSRP107161290	28.01.2008	ALPSRP268201290	05.02.2011	1744

Построение цифровой модели местности

Для построения цифровых моделей местности и расчета смещений необходимо подбирать пары радарных кадров с определенными параметрами съемки. Критичными значениями в данном случае являются временная и пространственная базовые линии. Увеличение первого параметра приводит к снижению когерентности разновременных радарных измерений вследствие изменений растительного покрова и диэлектрических свойств отражающей поверхности. Увеличение второго параметра ведет к возрастанию доли топографической составляющей интерферометрической фазы, пропорционально высотам отражающей поверхности. Опорная цифровая модель рельефа необходима для устранения топографической составляющей в процедуре дифференциальной интерферометрической обработки. В последствие на основе опорной цифровой модели рельефа рассчитывается топографическая фазовая компонента в процессе дифференциальной интерферометрической обработки. При построении опорной цифровой модели рельефа деформационную компоненту фазы (формула 2) обычно принимают равной нулю.

Наиболее точно восстанавливаются высоты открытых территорий (луга, торфяные болота). Области на цифровой модели рельефа, соответствующие лесным районам, обладают меньшей точностью. Водные объекты вследствие зеркального отражения сигнала от гладкой поверхности исключаются из рассмотрения (Евтушкин, 2009). Опорная цифровая модель рельефа необходима для устранения топографической составляющей в процедуре дифференциальной интерферометрической обработки. В последствие на основе опорной цифровой модели рельефа рассчитывается топографическая фазовая компонента в процессе дифференциальной интерферометрической обработки. При построении опорной цифровой модели рельефа деформационную компоненту фазы принимают равной нулю.

На основе двух пар (28.01.2008-15.12.2008) радарных кадров PALSAR построена уточненная цифровая модель местности (рис. 2), отражающая современное состояние земной поверхности Губкинского месторождения. В областях с низкой когерентностью, где значения высот не были рассчитаны, проведена интерполяция путем расчета усредненного значения ближайших точек. Данные интерферометрические пары обладают значительной длиной перпендикулярной базовой линии, поэтому погрешность определения высоты (формула 3) меньше. За счет использования трех разновременных кадров выполнено более корректное разделение топографической и дифференциальной компонент интерферометрической фазы. Вследствие применения более качественной фильтрации интерферограммы (метод Голдштейна) устранен шум, возникающий из-за изменения фазы переотражения за время между съемками.

Построение карт смещений и скоростей смещений

При обработке дифференциальной интерферометрической пары для построения карт смещений применима такая же зависимость когерентности от ландшафтов земной поверхности, как и при построении цифровой модели рельефа. При этом для лесных районов также имеет место маскирующее влияние густых растительных покровов, которое не позволяет определить смещения минерального грунта. Кроме того, при увеличении интервала между повторными съемками возрастают временная декорреляция, в связи с чем увеличивается площадь на карте смещений, для которой значения не определены.

Для расчета смещений земной поверхности использованы интерферометрические пары радарных кадров PALSAR полученные при съемке в режиме двойной комбинации поляризаций (Fine Beam Dual) с разрешением 10м. Подбирались пары, имеющие короткую перпендикулярную пространственную базу. В результате дифференциальной интерферометрической обработки пар кадров построены карты смещений за период 1-3 года. Отрицательные смещения земной поверхности обозначены на рисунках 1, 3 и 4 зеленым и синим цветами. Переход цвета с зеленого на красный соответствует нулевым смещениям, на основе чего можно определить границы мульды оседания, образовавшейся вследствие извлечения углеводородов.

Использование двух подходящих пар кадров позволило провести обработку по методу четырех-проходной интерферометрии.

$$\begin{cases} \Phi_{1,flat} = K_1 * H_{r,p} - \frac{4\pi}{\lambda} * V_p * T_1 \\ \Phi_{2,flat} = K_2 * H_{r,p} - \frac{4\pi}{\lambda} * V_p * T_2 \end{cases} \quad (5)$$

где

$$K_1 = -\frac{4\pi}{\lambda} \frac{B_{\perp,p,1}}{R_{1,p} \sin \theta_{p,1}}, K_2 = -\frac{4\pi}{\lambda} \frac{B_{\perp,p,2}}{R_{2,p} \sin \theta_{p,2}}$$

где: $\Phi_{1,flat}, \Phi_{2,flat}$ – выровненные интерферометрические фазы для первой и второй пар соответственно, $B_{\perp,p,1}, B_{\perp,p,2}$ - перпендикулярные базовые линии, $R_{1,p}, R_{2,p}$ – расстояния от антенны до точки на поверхности, $\theta_{p,1}, \theta_{p,2}$ – углы обзора, $H_{r,p}$ – ошибки устранения топографической составляющей, оставшиеся вследствие неточности опорного рельефа, V_p – скорость смещения земной поверхности, T_1, T_2 - временные базы обрабатываемых пар.

После расчета двух интерферограмм в соответствие с формулой 1 выполнено выравнивание, которое устраняет фазовую компоненту вследствие изменения наклонной дальности (первое слагаемое формулы 2) и топографическую составляющую (второе слагаемое формулы 2). В результате получаются фазы $\Phi_{1,flat}, \Phi_{2,flat}$. Решение системы уравнений 5 необходимо для разделения не устраниенной топографии $H_{r,p}$ и смещений поверхности, заключенных во втором слагаемом. Применение такого метода основано на предположении, что смещения имеют постоянную скорость в течение исследуемого временного интервала, который в данном случае составляет 3 года. Результирующая карта скоростей смещений (рис. 5) пересчитана в проекцию UTM-43 с размером пикселя 10м, что позволяет получить масштаб картосхемы 1:50000.

Сенсор PALSAR позволяет определить плановые координаты участка земной поверхности с точностью до 9.7 м (Shimada, 2009). Чтобы соотнести произведенные радиолокационные измерения с участком земной поверхности, который за время между съемками вдобавок ко всему изменил свое положение с P_1 на P_2 , выполняется совмещение (коррегистрация) радарных кадров. При помощи субпиксельной корегистрации точность совмещения кадров достигает 1/10 разрешения сенсора (для данных PALSAR в среднем 1м). Особенность радар-

ной интерферометрии заключается в расчете высот и смещений участков поверхности относительно соседних, поэтому получаемые значения мало подвержены влиянию орбитальных ошибок. Только параметры длины и ориентации базовой линии, а точнее их изменение вдоль линии следования спутника, могут вносить ощутимую ошибку в конечные результаты. Используя дополнительные наземные опорные точки для уточнения базовой линии, можно довести точность ее определения до 1мм.

При обработке радарных снимков для Губкинского месторождения не было данных наземных измерений на 2007–09 годы, которые могли быть использованы в качестве опорных точек. Для указания исходного смещения в процессе расчета абсолютных значений использованы пункты ГГДП, на которых получены минимальные по модулю смещения за 2001–06 гг. Это пункты: 7705, 4119, 2603, 5216, 3852, Пыреймаято. Таким образом, карты смещений за 2007–11 гг., построенные по результатам интерферометрической обработки радиолокационных измерений PALSAR, позволили обозначить нулевую границу мульды оседания, образовавшуюся на Губкинском газовом месторождении.

Построение карт смещений Самотлорского месторождения

На территорию Самотлорского нефтяного месторождения и геодинамического полигона проводился многолетний мониторинг просадок земной поверхности на основе данных PALSAR (Евтушкин, 2009; Васильев, 2010; Филатов, 2011). Методом трехпроходной интерферометрии построена картосхема смещений за период 2008–09 гг. (рис. 4) на основе 18 кадров с двух орбит с перекрытием. Точность определения смещений: составляет от 1 см в пределах СГДП, где использовались данные измерений абсолютных значений высот на реперах, до 4 см на краях. Отрицательные смещения связаны с активными мульдами оседания на расположенных на этой территории нескольких нефтяных месторождениях, положительные приурочены к развитию растительности.

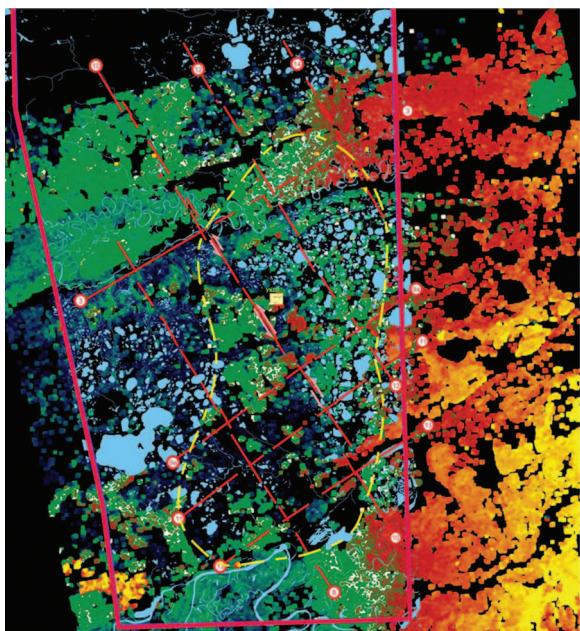


Рис. 1. Вертикальные смещения на ГГДП за 2 года (25.01.2007-15.12.2008) с наложением контура лицензионного участка, разломов разных порядков и мульды оседания 2008г. Диапазон вертикальных смещений от -5 до +7 мм

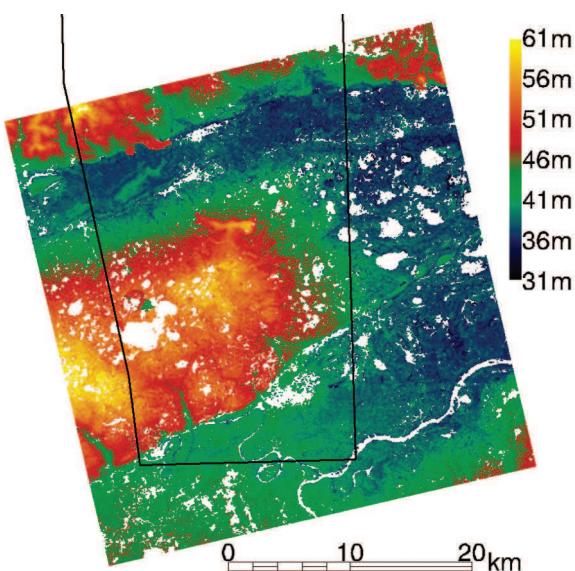


Рис. 2. Опорная цифровая модель местности Губкинского месторождения (результат обработки кадров PALSAR за 28.01.2008-15.12.2008)

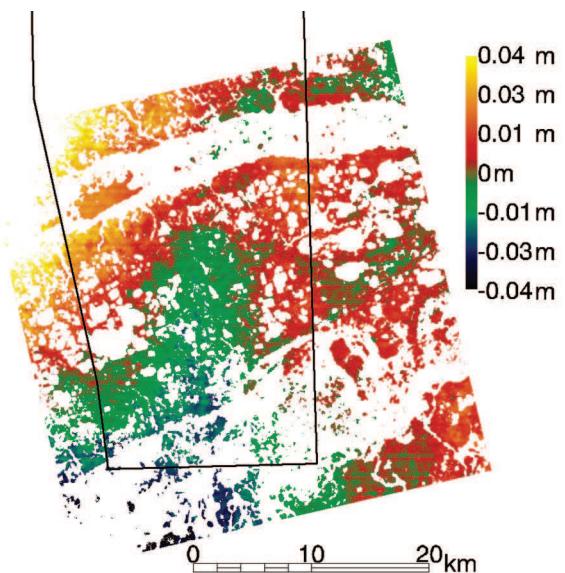


Рис. 3. Вертикальные смещения на ГГДП за два года (результат обработки кадров PALSAR за 28.07.2007-02.08.2009)

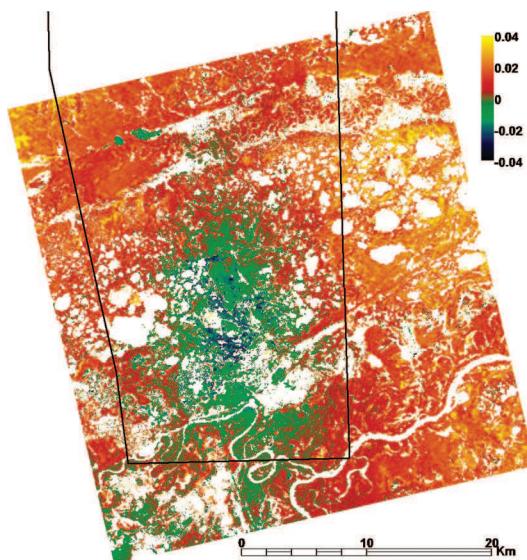


Рис. 4. Вертикальные смещения на ГГДП три года я выраженной мульдой оседания (результат обработки кадров PALSAR за 28.01.2008-05.02.2011)

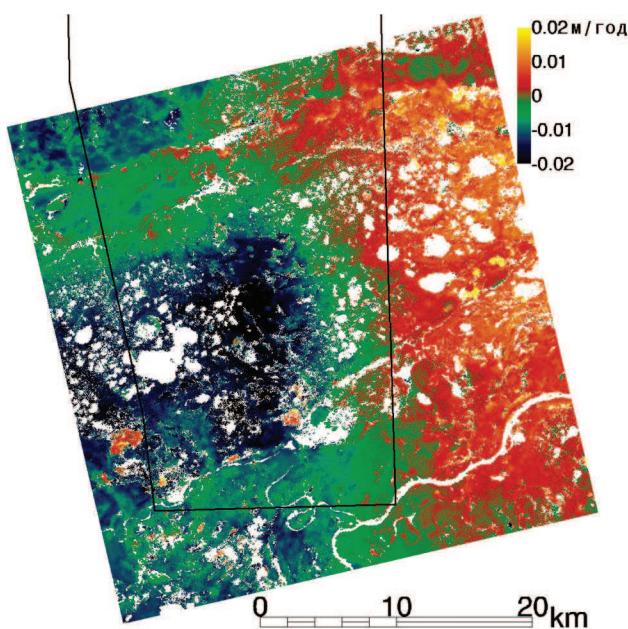


Рис. 5. Средняя скорость смещений земной поверхности Губкинского месторождения (результат обработки 4 кадров PALSAR за 2007–02.08.2009)

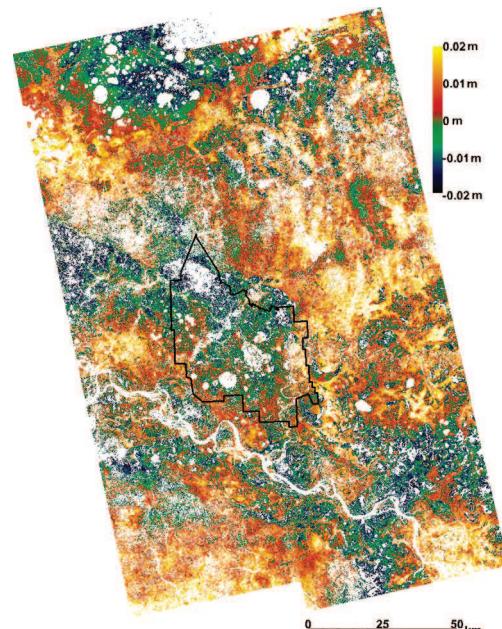


Рис. 6. Вертикальные смещения на Самотлорском месторождении и прилегающих территориях за 2008–2009 гг

Заключение

Карты смещений за 2007-11 гг., построенные по результатам интерферометрической обработки радиолокационных измерений, позволили обозначить нулевую границу мульды оседания, образовавшуюся на Губкинском газовом месторождении. Построенные мульды сдвижения, в значительной части своих площадей хорошо коррелируется с особенностями динамики пластовых давлений и предполагается, что мульды в той или иной степени формируются в результате интенсивной и многолетней разработки месторождения (1999-2011 годы).

Вертикальные и горизонтальные смещения дневной поверхности в результате интенсивного отбора газа из коллектора составляют в среднем 1.7 до 2.3 мм в год при падении пластового давления на одну атмосферу, что характерно для эксплуатируемых углеводородных месторождений в пределах средней длительности разработки 9 – 12 лет.

Анализ карт отбора газа и толщин подъема газо-водяного контакта, построенных на основе инструментальных наземных измерений, показывает, что мульды сдвижения за 2007–2011 года определенные методом многопроходной радарной интерферометрии хорошо коррелируются с величинами объема отобранного газа и подъемом уровня газо-водяного контакта.

Спутниковые данные ALOS\PALSAR предоставлены Японским агентством аэрокосмических исследований по грантам 07/JAXA/ASP №0704001 и 09/JAXA/AEO №022300. Работа выполняется при поддержке ФЦП «Исследования и разработки по приоритетным направлениям развития научно-технологического комплекса России на 2007-2013 годы», проект №2011-1.4-514-036-004 «Разработка программно-методического обеспечения высокоточной оценки смещений техногенных объектов на основе метода интерферометрической обработки спутниковых радиолокационных данных».

Литература

1. Hoffmann J. The application of satellite radar interferometry to the study of land subsidence over developed aquifer systems. Ph. D. dissertation, Stanford University, California, 2003. – 211 p.
2. Ferretti A., Monti-Guarnieri A., Prati C. InSAR Principles: Guidelines for SAR Interferometry Processing and Interpretation. 2007. ESA Publications. Noordwijk. 234 p.
3. Shimada M., Isoguchi O., Tadono T. and Isono K. PALSAR Radiometric and Geometric Calibration // IEEE Trans. Geoscience and Remote Sensing, 2009. V.47. No. 12. P.3915-3932.
4. Strozzi T., Delaloye R., Poffet D., Hansmann J., Loew S. Surface subsidence and uplift above a headrace tunnel in metamorphic basement rocks of the Swiss Alps as detected by satellite SAR interferometry // Remote Sensing of Environment. 2011. V.115. P.1353–1360
5. Filatov A., Yevtyushkin A. Detection of ground surface displacements in area of intensive oil and gas production by InSAR data // Proceedings of the ESA Living Planet Symposium. 28 June – 2 July 2010. Bergen, Norway. ESA SP-686. European Space Agency, Noordwijk.
6. Геодинамический мониторинг на Губкинском техногенном полигоне (На основе анализа геолого-промышленных показателей Губкинского газового месторождения и данных интерферометрической обработки радиолокационной космической съемки дневной поверхности) // Отчет по НИР. ЗСФ ИНГГ СО РАН. Тюмень. 2008. 184 с.
7. Евтушкин А.В., Филатов А.В. Оценка деформаций земной поверхности в районах интенсивной нефтедобычи в Западной Сибири методом PCA интерферометрии по данным ENVISAT\ASAR и ALOS\PALSAR // Современные проблемы дистанционного зондирования Земли из космоса. 2009. Т.6. №2. С.46–53.
8. Васильев Ю.В., Евтушкин А.В., Мартынов О.С., Радченко А.В., Филатов А.В. Использование данных PALSAR при выполнении геодинамического мониторинга нефтегазовых месторождений // Современные проблемы дистанционного зондирования Земли из космоса, 2010. Т.7. №2. С. 122–128.
9. Филатов А.В., Евтушкин А.В., Васильев Ю.В. Определение смещений техногенных объектов на территории нефтяных месторождений методом радарной интерферометрии // Современные проблемы дистанционного зондирования Земли из космоса. 2011. Т.8. №2. С.157–165.

Long-term geodynamic monitoring of oil and gas fields in Western Siberia by InSar technique

A.V. Filatov¹, A.V. Yevtyushkin¹, Yu.V. Vasiliev²

*¹Immanuel Kant Baltic Federal University,
236041 Russia, Kaliningrad, 14 Nevskogo str.*

E-mail: AnFilatov@kantiana.ru

AYevtyushkin@kantiana.ru

²West Siberian Division

*of the Trofimuk Institute of Petroleum Geology and Geophysics SB RAS,
625670 Russia, Tyumen, 56 Volodarskogo str.*

E-mail: radan92@list.ru

In work results of interferometric processing of a series of long-term data of a sensor of ALOS\PALSAR are presented. For research of sags of a terrestrial surface territories Gubkinsky gas condensate and Samotlorsky oil fields on which geodynamic polygons for monitoring sedimentations function are chosen. Features of calculation of basic DEM and maps of subsidence's are considered. The approach for calculation maps of constant velocities of subsidence on small time intervals is offered.

Keywords: radar interferometry, geodynamic polygon, subsidence, ALOS, PALSAR.