

О точности расчёта вертикальной и восточной компонент смещения земной поверхности по снимкам спутниковых радаров с синтезированной апертурой с двух орбит

И. П. Бабаянц¹, В. О. Михайлов^{1,2}, Е. П. Тимошкина¹, С. А. Хайретдинов¹

¹ *Институт физики Земли им. О. Ю. Шмидта РАН, Москва, 123995, Россия
E-mail: pa81@ya.ru*

² *Московский государственный университет имени М. В. Ломоносова
Москва, 119991, Россия*

Спутниковые радары с синтезированной апертурой (РСА) позволяют определять изменение расстояния от спутника до отражающей площадки на поверхности Земли за период времени между повторными снимками, т. е. находить смещения отдельных участков земной поверхности и объектов инфраструктуры в направлении на спутник. Поскольку угол наклона зондирующего луча для различных спутников составляет от 30 до 50° от вертикали, эти смещения составляют сумму трёх компонент вектора смещений отражающей площадки (по вертикали, на север и на восток), умноженных на синусы и косинусы углов наклона зондирующего луча и азимута полёта спутника. Орбита РСА-спутников близка к полярной, поэтому смещения на север суммируются с коэффициентом, существенно меньшим, чем смещения по вертикали и на восток. Если есть основания полагать, что северная компонента смещений не превосходит смещения в других направлениях, то вкладом северной компоненты можно пренебречь. Тогда, располагая полями смещений, полученными по снимкам с нисходящей и восходящей орбит, можно рассчитать вертикальную и восточную компоненту смещений. Если можно предположить, что горизонтальная компонента смещений не превосходит вертикальную, то, пренебрегая горизонтальными компонентами, можно оценить вертикальную компоненту смещения по данным с одной орбиты, поделив смещения, рассчитанные в направлении на спутник, на косинус угла наклона зондирующего луча. Такие оценки часто делаются при мониторинге различных природных и техногенных объектов. В работе выполнена оценка точности такого расчёта на теоретической модели подземного хранилища газа (ПХГ). Для решения поставленной задачи мы использовали трёхмерную модель ПХГ, близкую к одному из подземных хранилищ, для которого ранее нами были проведены расчёты по реальным данным. Используя данные о контурах ПХГ, глубине и мощности резервуара, мы задали близкое к реальному теоретическое изменение давления в период отбора газа. Это позволило рассчитать теоретические поля смещений земной поверхности по трём координатам: по вертикали, на север и на восток, а также смещения в направлении на спутник для съёмки с восходящей и нисходящей орбит, используя реальные углы наклона зондирующего луча и азимуты полёта. После этого были рассчитаны субвертикальные смещения в предположении, что горизонтальная компонента смещения невелика. Также с использованием совместно смещений с восходящей и нисходящей орбит были рассчитаны вертикальные и восточные компоненты смещений в предположении, что северной компонентой смещений можно пренебречь. Амплитуда субвертикальной компоненты смещений определяется с хорошей точностью, но области поднятий и оседаний оказываются сдвинутыми в сторону спутника. Ошибки расчёта вертикальной и восточной компонент смещений по данным с двух орбит не превосходят первых процентов. Следовательно, расчёт компонент смещений по данным с двух орбит не должен приводить к существенным ошибкам при оценке вертикальной и восточной компонент вектора смещений в реальных ситуациях, по крайней мере для ПХГ и месторождений нефти и газа.

Ключевые слова: спутниковая радарная интерферометрия, смещения земной поверхности, съёмка с двух орбит, расчёт вертикальной и восточной компонент смещений, подземные хранилища газа

Одобрена к печати: 30.03.2023

DOI: 10.21046/2070-7401-2023-20-2-135-143

Введение

Спутниковая радарная интерферометрия — эффективный инструмент определения смещений земной поверхности и объектов инфраструктуры. Спутниковые радары с синтезированной апертурой (РСА) посылают электромагнитные импульсы под некоторым углом к вертикали, обычно вправо от направления полёта. Анализ фазового сдвига отражённых сигналов, полученных от одной и той же отражающей площадки при выполнении двух или нескольких последовательных снимков, позволяет определять изменение расстояния от спутника до этой площадки за период съёмки. Эти смещения в направлении на спутник, называемом в англоязычной литературе *line-of-sight* (LOS), следующим образом связаны со смещениями отражающей площадки на север, восток и по вертикали (U_N , U_E и U_z) (Hanssen, 2001):

$$U_{\text{LOS}} = U_z \cos \theta + \sin \theta \cdot (U_N \sin \beta - U_E \cos \beta), \quad (1)$$

где U_{LOS} — смещения в направлении на спутник (положительные — к спутнику); θ — угол отклонения от вертикали направления распространения радарного сигнала (LOS); β — азимут орбиты, смещения U_z положительны при смещениях вверх. Одну и ту же территорию спутник может снимать дважды: когда он движется с юга на север (восходящая орбита) и посылает зондирующий луч в восточном направлении, а также когда он движется с севера на юг (нисходящая орбита) и зондирующий луч направлен на запад. В этом случае возникают два уравнения вида (1) с различными коэффициентами. Типичные значения азимута нисходящей орбиты спутника Sentinel-1 — $\beta = 189^\circ$, средний угол наклона зондирующего луча в плоскости перпендикулярной к орбите $\theta = 40^\circ$. Тогда для нисходящей (des) орбиты имеем:

$$U_{\text{LOS}}^{\text{des}} = 0,766U_z - 0,101U_N + 0,635U_E. \quad (2)$$

Для восходящей (asc) орбиты примем $\beta = 349^\circ$ и $\theta = 40^\circ$, тогда для этой орбиты:

$$U_{\text{LOS}}^{\text{asc}} = 0,766U_z - 0,123U_N - 0,631U_E. \quad (3)$$

Итак, северная компонента смещений суммируется с коэффициентом, заметно меньшим, чем смещения восточной и вертикальной компонент. Если имеются данные только с одной орбиты и есть основания полагать, что горизонтальная компонента смещений не превосходит вертикальную, можно оценить вертикальную компоненту смещения, разделив смещения в направлении на спутник на косинус угла наклона зондирующего луча. Эти смещения назовём субвертикальными. Если имеются снимки с нисходящей и восходящей орбиты и есть основания полагать, что смещения северной компоненты не превосходят компоненты смещения в других направлениях, то можно компонентой смещения U_N в формулах (2)–(3) пренебречь и из двух уравнений рассчитать вертикальную и восточную компоненты смещения. Такие оценки часто выполняются при мониторинге различных природных и техногенных объектов. Исключим из уравнения (3) восточную компоненту. Тогда коэффициент при северной компоненте U_N будет равен коэффициенту при вертикальной компоненте U_z , умноженному на 0,146. Итак, даже если северная компонента окажется равной вертикальной, ошибка оценки U_z будет менее 15 %. Исключим теперь из уравнений (3) вертикальную компоненту. Тогда коэффициент при U_N будет равен коэффициенту при восточной компоненте U_E , умноженному на 0,017, т. е. ошибка в расчёте U_E с двух орбит будет менее 2 %. В работе сделана оценка точности таких расчётов на теоретической модели подземных хранилищ газа (ПХГ).

Модель смещений земной поверхности для подземного хранилища газа

Для исследования точности оценки компонент смещений на восток и по вертикали по данным с одной или с двух орбит мы использовали модель, близкую к ПХГ, для которого мы проводили расчёты по реальным данным. Пусть за некоторый период времени на ПХГ про-

изведён отбор газа из слоя постоянной мощности $H = 100$ м с глубиной средней линии $D = 350$ м, ограниченного некоторым замкнутым контуром. Будем считать, что связанные с этим смещения земной поверхности зарегистрированы с восходящей и нисходящей орбит спутника Sentinel-1. Зададим суммарное изменение давления P в период отбора газа в виде:

$$\Delta P(x, y) = P_0 \exp\left(\frac{x^2 + y^2}{a}\right), \quad (4)$$

где $P_0 = -1,6$ МПа; $a = 5$ км²; начало координат расположено в точке с географическими координатами (λ_0, θ_0) на земной поверхности над центром ПХГ; (x, y) — расстояние в километрах от текущей точки счёта (λ, θ) до начала координат. Ось X направлена на восток, Y — на север, Z — вверх. Сферичностью Земли в пределах ПХГ пренебрегаем.

Для расчёта компонент смещений используем известное решение задачи теории упругости о смещениях поверхности упругого полупространства в результате изменения давления в расположенном под поверхностью на глубине D малом сферическом объёме. Согласно работе (Geertsma, 1973), смещения свободной поверхности на восток, север и по вертикали (U_x, U_y, U_z) в результате изменения давления ΔP в малом объёме V задаются формулами:

$$\begin{cases} U_x(x, y, 0) = AV \frac{x}{R^3}, \\ U_y(x, y, 0) = AV \frac{y}{R^3}, \\ U_z(x, y, 0) = AV \frac{D}{R^3}, \end{cases} \quad (5)$$

где $A = (\Delta P \cdot c_m (1 - \nu)) / \pi$ — безразмерный коэффициент; ν — коэффициент Пуассона; V — объём сферической области, где меняется давление; D — глубина её центра; c_m — коэффициент одноосного уплотнения пород резервуара; R — расстояние от центра сферической области с координатами $(0, 0, D)$ до точки расчёта смещений на дневной поверхности $(x, y, 0)$. Поскольку мощность резервуара существенно меньше его горизонтальных размеров, при выводе соотношений (5) принято, что деформации пласта происходят в основном по вертикали. В этом случае коэффициент одноосной сжимаемости c_m можно получить из общих уравнений теории пороупругости (Biot, 1956) путём задания горизонтальных деформаций равными нулю. Тогда коэффициент одноосной сжимаемости связан с коэффициентом объёмной сжимаемости c_b и коэффициентом объёмной сжимаемости скелета c_r соотношением:

$$c_m = \frac{1 + \nu}{3(1 - \nu)} (c_b - c_r). \quad (6)$$

При этом в формуле (6) часто допускают, что коэффициент сжимаемости скелета существенно меньше коэффициента объёмной сжимаемости. Для изотропной среды также справедливо соотношение (например, (Вау et al., 2004)):

$$c_m = \frac{(1 - 2\nu) \cdot (1 + \nu)}{E (1 - \nu)}, \quad (7)$$

где E — модуль Юнга.

По сути уравнения (5) выступают функциями точечного источника. Если изменение давления происходит в некоторой области, то для получения суммарного эффекта уравнения (5) следует проинтегрировать по объёму этой области. Для моделирования смещений дневной поверхности на ПХГ разобьём эксплуатируемый горизонт на небольшие прямоугольные элементы — пластины со сторонами, параллельными осям координат Ox и Oy , и будем считать, что изменение давления в каждой пластине постоянно, а её толщина мала по сравнению с её глубиной. Тогда, интегрируя уравнения (5) в пределах каждой прямоугольной площадки, получим:

$$\begin{cases} U_x(x, y, z) = AH \frac{1}{2} \left[\ln \left(\frac{R - (\eta - y)}{R + (\eta - y)} \right) \right]_{\xi_1, \eta_1}^{\xi_2, \eta_2}, \\ U_y(x, y, z) = AH \frac{1}{2} \left[\ln \left(\frac{R - (\xi - x)}{R + (\xi - x)} \right) \right]_{\xi_1, \eta_1}^{\xi_2, \eta_2}, \\ U_z(x, y, z) = AH \left[\operatorname{arctg} \left(\frac{(\xi - x) \cdot (\eta - y)}{(D - z)R} \right) \right]_{\xi_1, \eta_1}^{\xi_2, \eta_2}, \end{cases} \quad (8)$$

где H — толщина пластины; (x, y) — координаты точки на земной поверхности ($z = 0$), в которой рассчитываются смещения; D — глубина пластины; квадратные скобки обозначают последовательную подстановку пределов интегрирования (четырёх углов пластины), которая располагается вдоль оси Ox от ξ_1 до ξ_2 , а вдоль оси Oy — от η_1 до η_2 ; R — декартово расстояние от точки (x, y) до соответствующего угла пластины.

Далее в пределах контура ПХГ мы аппроксимировали пласт, в который происходит закачка и отбор газа, набором прямоугольных пластин, в каждой из которых задали изменение давления по формуле (4). Остальные параметры, входящие в коэффициент A в формуле (8), были для всех элементов одинаковыми: $\nu = 0,5$; $c_m = 6 \cdot 10^{-4} \text{ МПа}^{-1}$ — величины, характерные для песчаных слоёв с высокой пористостью (Geertsma, 1973); $H = 100 \text{ м}$; $D = 0,35 \text{ км}$, горизонтальные размеры пластин по широте и долготе составляли $0,005^\circ$.

Теперь на основе уравнений (8) можно рассчитать компоненты смещения по трём направлениям, а также смещения на спутник для съёмки с восходящей и нисходящей орбит, используя реальные углы наклона зондирующего луча и азимуты полёта (рис. 1).

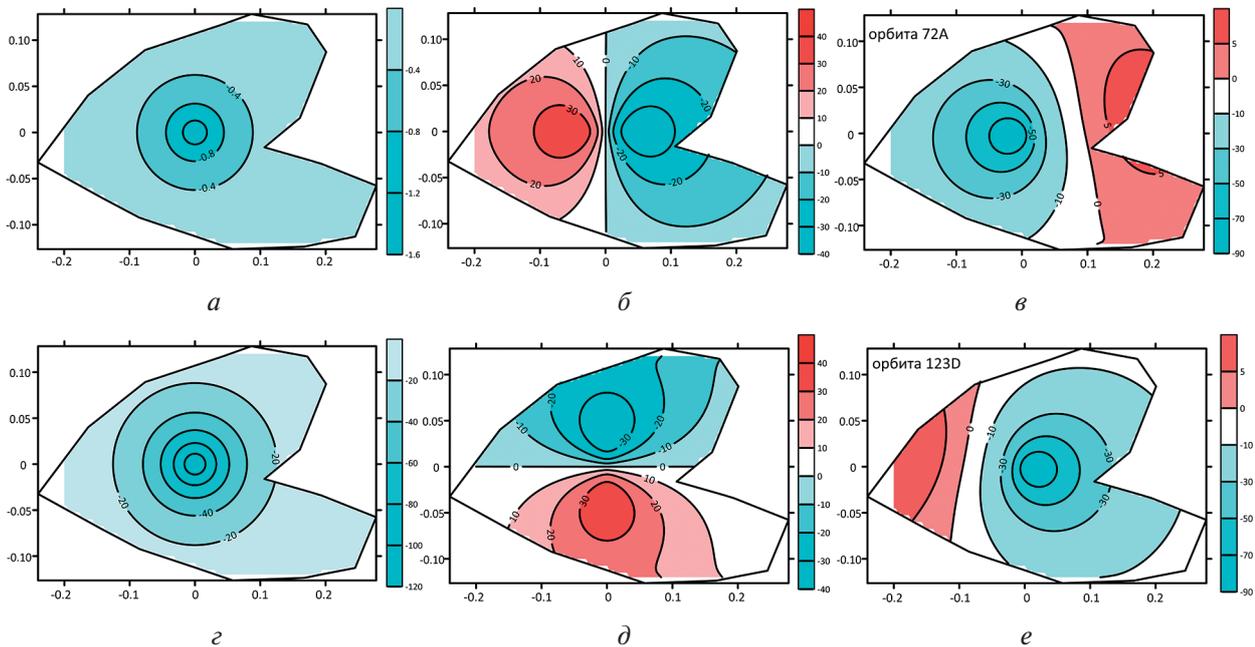


Рис. 1. Карта падения давления в результате отбора газа (в МПа) (а); карты компонент смещений (в мм): вертикальной (б), восточной (в), северной (д) и в направлении LOS для восходящей (е) и нисходящей (е) орбиты. Восходящая орбита проходит западнее ПХГ, нисходящая — восточнее. Оси — расстояние от области максимального падения давления (в град): $0,1^\circ$ по широте соответствует примерно 11,1 км, по долготе — 7,9 км. Чёрный контур — границы модельного ПХГ

Реальная съёмка ПХГ осуществлялась с орбит с азимутом $190,5$ и $349,5^\circ$. Углы наклона зондирующего луча были взяты с соответствующих снимков области ПХГ. Заметим, что на

картах смещений в направлении LOS наряду с областью «оседаний» (смещений от спутника) имеются и области небольших положительных смещений (к спутнику). Они возникают там, где вклад горизонтальной компоненты смещений в формуле (1) превосходит вклад вертикальной компоненты смещений. Максимум в поле смещений на спутник всегда смещается относительно точки максимального оседания вертикальной компоненты (см. рис. 1г) в сторону спутника, т. е. для восходящей орбиты (см. рис. 1в) — на запад, для нисходящей орбиты (см. рис. 1е) — на восток. В дальней от спутника области возникает смещение противоположного знака. Максимальное вертикальное оседание в теоретической модели: $-115,3$ мм по картам рис. 1в и е, максимальное смещение в направлении LOS: $-88,4$ мм, поднятия на краях ПХГ достигают $10,0$ мм.

Далее, полагая, что горизонтальная компонента смещения не превосходит вертикальную, оценим субвертикальные смещения с каждой орбиты, получаемые делением смещений в направлении LOS на $\cos\theta$ (рис. 2). Из рисунка следует, что максимумы субвертикальных смещений для восходящей и нисходящей орбит смещены так же, как и на соответствующих картах смещений в направлении на спутник (см. рис. 1в и е). При максимальной амплитуде вертикальных смещений $115,3$ мм субвертикальные смещения с восходящей и нисходящей орбит дали несколько бóльшие значения, равные $125,4$ мм. Области поднятий на периферии ПХГ также сохранились. Максимальные погрешности фиксируются примерно в той же области, в которой достигают максимума смещения на восток (см. рис. 1б), т. е. на западном и восточном бортах мульды оседаний.

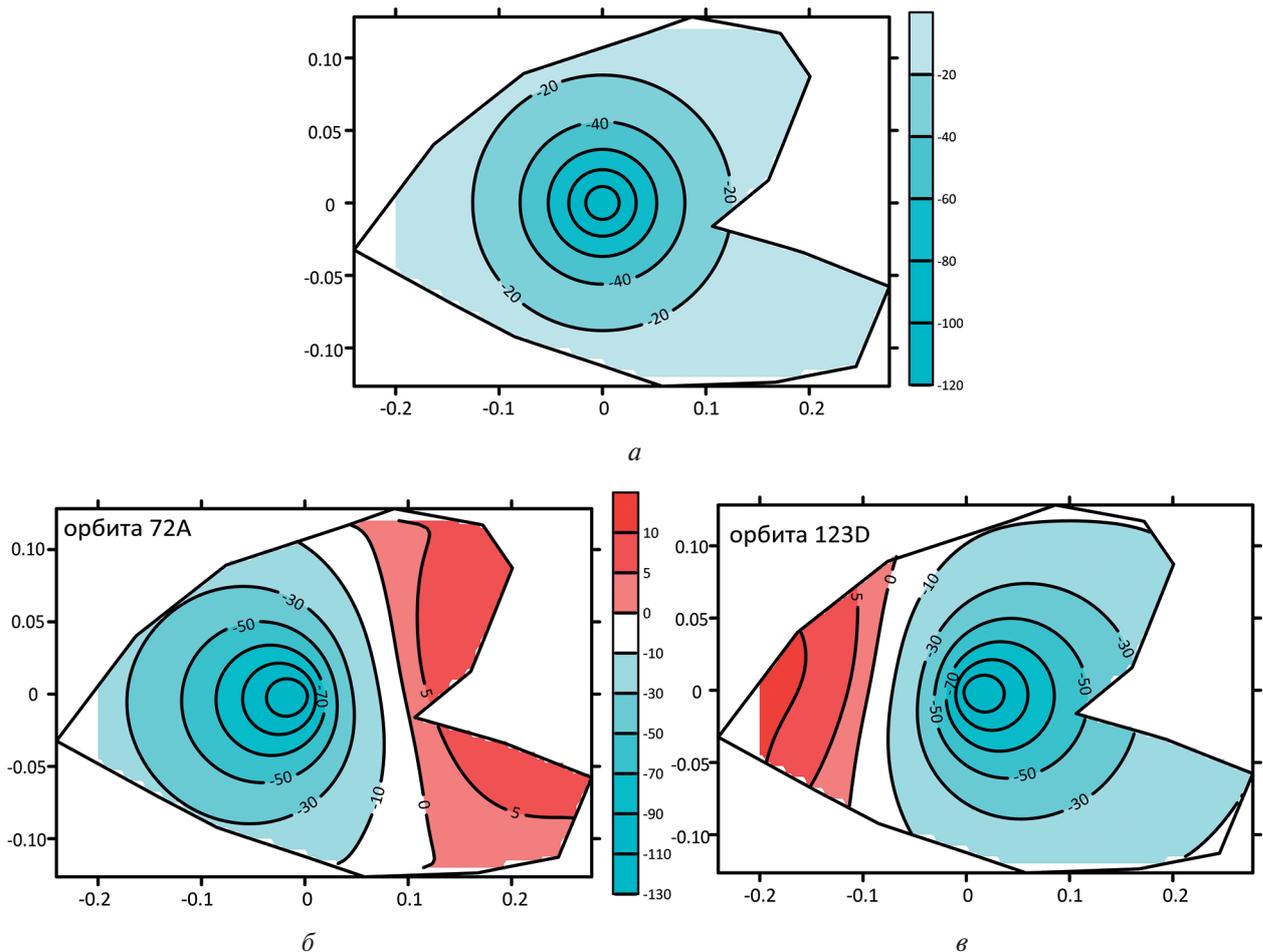


Рис. 2. Сравнение теоретической вертикальной компоненты смещений (а) и субвертикальных смещений, полученных с восходящей (б) и нисходящей (в) орбиты. Цветовая шкала в миллиметрах; по осям — расстояние от области максимального падения давления (в град): $0,1^\circ$ по широте соответствует примерно $11,1$ км, по долготе — $7,9$ км. Чёрный контур — границы модельного ПХГ

На рис. 3 приведён профиль, пересекающий ПХГ по центру области оседаний с запада на восток. Максимум субвертикальных смещений смещён в направлении к спутнику, обращённое к спутнику крыло мульды сдвижения — более пологое. Амплитуды оседаний определяются с точностью 8 % (125 мм с одной орбиты при истинном значении 115,34 мм).

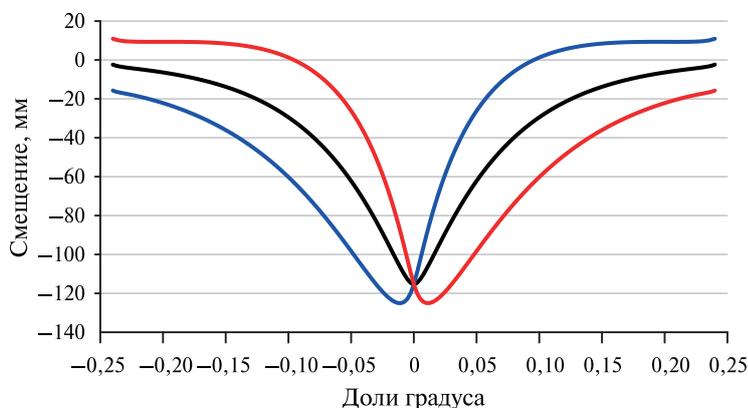


Рис. 3. Вертикальные смещения вдоль профиля, пересекающего ПХГ с запада на восток (чёрная кривая). Синий график — субвертикальные смещения, рассчитанные с восходящей орбиты; красный — то же с нисходящей орбиты; $0,1^\circ$ соответствует примерно 7,9 км

Далее с использованием рассчитанных смещений в направлении на спутник с одной восходящей и одной нисходящей орбит по формулам (2) и (3) были рассчитаны вертикальные и восточные компоненты смещений в предположении, что северной компонентой смещений можно пренебречь (рис. 4б и д). Полученные смещения были сопоставлены с модельными (теоретическими) смещениями вертикальной и восточной компонент, их разность представлена на рис. 4в и е.

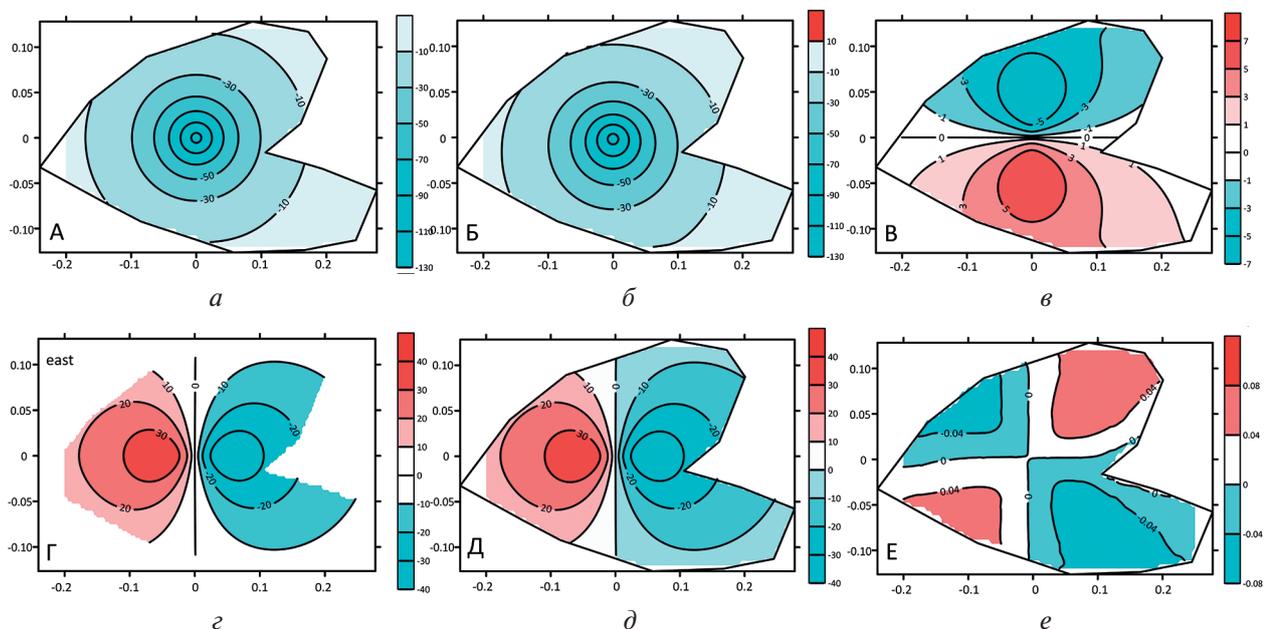


Рис. 4. Сопоставление теоретических вертикальной (а) и восточной (г) компонент смещений со смещениями, рассчитанными с двух орбит, в предположении, что северной компонентой смещений можно пренебречь. Карты (б) и (д) показывают полученные компоненты смещения по вертикали и на восток; на картах (в) и (е) показана разность теоретических и расчётных величин. Смещения в миллиметрах; по осям — расстояние от области максимального падения давления (в град): $0,1^\circ$ по широте соответствует примерно 11,1 км, по долготе — 7,9 км. Чёрный контур — границы модельного ПХГ

Сопоставление показало, что ошибки расчёта вертикальной и восточной компонент смещений не превосходят 1 см, т.е. находятся на уровне точности метода РСА-интерферометрии. Действительно, максимальное значение вертикальной компоненты смещений определено совершенно точно (–115,3 мм) и не смещено. Максимальные расхождения между теоретическими и расчётными значениями располагаются на северном и южном бортах мульды оседаний, в области максимальной северной компоненты смещений (см. рис. 1д). Здесь они достигают 4,9 мм при максимальном значении оседаний –115,3 мм, т.е. 4 % (см. рис. 4в). Максимальная ошибка определения восточной компоненты смещений составила всего 0,08 мм при максимальном смещении восточной компоненты 37,0 мм (см. рис. 4г–е). Следовательно, расчёт смещений по данным с двух орбит не должен приводить к существенным ошибкам при оценке вертикальной и восточной компонент вектора смещений в реальных ситуациях — по крайней мере для ПХГ и месторождений нефти и газа.

Это заключение не согласуется с выводами работы Д. К. Кузьмина (2021), в которой автор, вместо расчёта вертикальной компоненты смещений по формуле (1) для восходящей и нисходящей орбит, сравнивает теоретические вертикальные смещения с полусуммой смещений с восходящей и нисходящей орбит. В результате таких вычислений получится величина, близкая к вертикальной компоненте, умноженной на косинус угла наклона зондирующего луча (см. формулу (1)). При сравнении с истинными значениями результат суммирования надо было разделить на $\cos\theta$, чего в цитируемой работе не было сделано, и её автор пришёл к ошибочному заключению, что расчёт смещений с двух орбит приводит к большим ошибкам в оценке вертикальной компоненты смещений.

В заключение отметим, что более строгий подход к определению трёх компонент вектора смещений основан на использовании соотношений между тремя компонентами вектора смещений, следующих из численных моделей исследуемого процесса. Примеры такого подхода для ПХГ и месторождений нефти и газа, оползневых склонов и областей землетрясений можно найти, например, в работах (Михайлов и др., 2010, 2012, 2014). В частности, для нефтегазовых месторождений или ПХГ эксплуатируемый горизонт можно аппроксимировать набором точечных источников деформации (5) или тонких пластин (8). Далее, рассчитав смещения земной поверхности в направлении LOS для каждого источника при единичном изменении давления, можно решить систему линейных уравнений и найти изменение давления в каждом элементе, аппроксимирующем реальный резервуар (Михайлов и др., 2012; Mikhailov et al., 2014). В эту систему легко включить также данные спутниковой и наземной геодезии. После этого по полученной аппроксимирующей конструкции могут быть рассчитаны смещения по трём направлениям. Также могут быть рассчитаны поля напряжений и деформаций, наклоны поверхности и другие характеристики, используемые для оценки опасности наблюдаемых смещений земной поверхности для объектов инфраструктуры.

Исследование выполнено в рамках темы № 0144-2019-0016 госзадания Института физики Земли им. О. Ю. Шмидта РАН.

Литература

1. Кузьмин Д. К. Моделирование смещений земной поверхности, полученных различными спутниками со встроенным модулем РСА (на примере мониторинга месторождений нефти и газа) // Проблемы недропользования. 2021. № 2(29). С. 94–104. DOI: 10.25635/2313-1586.2021.02.094.
2. Михайлов В. О., Назарян А. Н., Смирнов В. Б., Диаман М., Шапиро Н., Киселева Е. А., Тихоцкий С. А., Поляков С. А., Смольянинова Е. И., Тимошкина Е. П. Совместная интерпретация данных дифференциальной спутниковой интерферометрии и GPS на примере Алтайского (Чуйского) землетрясения 27.09.2003 // Изв. Российской акад. наук. Физика Земли. 2010. № 2. С. 3–16.
3. Михайлов В. О., Киселева Е. А., Дмитриев П. Н., Голубев В. И., Смольянинова Е. И., Тимошкина Е. П. Оценка полного вектора смещений земной поверхности и техногенных объектов по данным радарной спутниковой интерферометрии для областей разработки месторождений нефти и газа // Геофиз. исслед. 2012. № 3. С. 5–17.

4. Михайлов В. О., Киселева Е. А., Смольянинова Е. И., Дмитриев П. Н., Голубев В. И., Исаев Ю. С., Дорохин К. А., Тимошкина Е. П., Хайретдинов С. А. Некоторые проблемы мониторинга оползневых процессов с использованием спутниковых радарных снимков с различной длиной волны на примере двух оползневых склонов в районе Большого Сочи // Изв. Российской акад. наук. Физика Земли. 2014. № 4. С. 120–130. DOI: 10.7868/S0002333714040103.
5. Baú D., Ferronato M., Gambolati G., Teatini P. Surface Flow Boundary Conditions in Modeling Land Subsidence Due to Fluid Withdrawal // Ground Water. 2004. V. 42(4). P. 516–525. DOI: 10.1111/j.1745-6584.2004.tb02620.x.
6. Biot M. A. General Solutions of the Equations of Elasticity and Consolidation for a Porous Medium // J. Applied Mechanics. 1956. V. 23. P. 91–96.
7. Geertsma J. Land Subsidence Above Compacting Oil and Gas Reservoirs // J. Petroleum Technology. 1973. V. 59. No. 6. P. 734–744. <https://doi.org/10.2118/3730-PA>.
8. Hanssen R. F. Radar Interferometry: Data Interpretation and Error Analysis. N. Y.; Boston; Dordrecht; L.; M.: Kluwer Academic Publishers, 2001. 308 p. <https://doi.org/10.1007/0-306-47633-9>.
9. Mikhailov V., Kiseleva E., Dmitriev P., Golubev V., Smolyaninova E., Timoshkina E. On reconstruction of the three displacement vector components from SAR LOS displacements for oil and gas producing fields // Procedia Technology. 2014. V. 16. P. 385–393. DOI: 10.1016/j.protcy.2014.10.104.

On the accuracy of the vertical and eastern components of the Earth's surface displacements calculated from SAR images obtained from two orbits

I. P. Babayantz¹, V. O. Mikhailov^{1,2}, E. P. Timoshkina¹, S. A. Khairtdinov¹

¹ *Schmidt Institute of Physics of the Earth RAS, Moscow 123995, Russia*
E-mail: pa81@ya.ru

² *Lomonosov Moscow State University, Moscow 119991, Russia*

Satellite synthetic aperture radar (SAR) images make it possible to determine the change in the distance from the satellite to the reflecting object on the Earth's surface over the time period between repeated imaging, i.e. determine the displacement of individual reflectors on the Earth's surface or infrastructure in the direction to the satellite. Since the incidence angle of the radar emission for various satellites ranges from 30 to 50 degrees from the vertical, these displacements are the sum of the three components of the reflecting object displacement in the vertical, northern and eastern directions, multiplied by the sines and cosines of the sounding beam incidence angle and the azimuth of the satellite orbit. Because the satellite orbit is close to the polar one, the northern displacements are summed up with a coefficient significantly smaller than the vertical and eastern components. If it can be assumed that northern displacements do not exceed displacements in the other directions, then the contribution of the northern component can be neglected. Then, calculating displacement fields using images from the descending and ascending orbits, one can calculate the displacements along the vertical and to the east. If it can be assumed that the horizontal displacements do not exceed the vertical ones, then, neglecting both horizontal components, one can estimate the subvertical displacements using images from one orbit by dividing the displacements toward the satellite by the cosine of the incidence angle. Such assessments are often made when monitoring various natural and technogenic objects. The paper assesses the accuracy of such estimates on a theoretical model of an underground gas storage (UGS) facility. To solve the problem, we used a three-dimensional UGS model close to one of the underground storage facilities, for which we had previously performed calculations based on real data. Using the data on the boundary of the UGS facilities, the depth and thickness of the reservoir, we set a theoretical pressure change close to the real one during the period of gas withdrawal. This made it possible to calculate the synthetic fields of displacements on the Earth's surface in vertical, northern and eastern directions, as well as displacements toward the satellite for imaging from ascending and descending orbits, using the real incidence angles of the satellite signal and azimuth of the orbits. After that, the subvertical displacements were calculated, assuming that the horizontal displacements are small. Then, using both the ascending and descending orbits, the vertical and eastern components were calculated, assuming that the northern displacements can be neglected. The amplitude of subvertical displacements is determined with good accuracy, but the regions of "uplift" and "subsidence" on line-of-sight

displacement map turn out to be shifted towards the satellite. The errors in calculating the vertical and eastern displacements based on data from two orbits do not exceed a few percent. Therefore, the calculations of displacements based on data from two orbits should not lead to significant errors in estimating the vertical and eastern components of the displacement vector in real situations, at least for UGS's and oil and gas fields.

Keywords: SAR interferometry, subsidences, imaging from ascending and descending orbits, estimates of vertical and eastern components of displacements, underground gas storages

Accepted: 30.03.2023

DOI: 10.21046/2070-7401-2023-20-2-135-143

References

1. Kuzmin D. K., Modeling of the earth's surface displacements obtained by various satellites with a built-in sar-module (exemplified by monitoring oil and gas fields), *Problemy nedropolzovania*, 2021, Vol. 2(29), pp. 94–104 (in Russian), DOI: 10.25635/2313-1586.2021.02.094.
2. Mikhailov V. O., Nazaryan A. N., Smirnov V. B., Diament M., Shapiro N., Kiseleva E. A., Tikhotskii S. A., Polyakov S. A., Smol'yaninova E. I., Timoshkina E. P., Joint inversion of the differential satellite interferometry and GPS data: A case study of Altai (Chuia) Earthquake of September 27, 2003, *Izvestiya, Physics of the Solid Earth*, Vol. 46, pp. 91–103, DOI: 10.1134/S1069351310020011.
3. Mikhailov V. O., Kiseleva E. A., Dmitriev P. N., Golubev V. I., Smol'yaninova E. I., Timoshkina E. P., Estimation of full vector of displacements of the Earth's surface and technogenic objects based on InSAR data applied to oil and gas production areas, *Geofizicheskie Issledovaniya*, 2012, Vol. 13, No. 3, pp. 5–17 (in Russian).
4. Mikhailov V. O., Kiseleva E. A., Smol'yaninova E. I., Dmitriev P. N., Golubev V. I., Isaev Yu. S., Dorokhin K. A., Timoshkina E. P., Khairtdinov S. A., Some problems of landslide monitoring using satellite radar imagery with different wavelengths: Case study of two landslides in the region of Greater Sochi, *Izvestiya, Physics of the Solid Earth*, 2014, Vol. 50, No. 4, pp. 576–587, DOI: 10.1134/S1069351314040107.
5. Baú D., Ferronato M., Gambolati G., Teatini P., Surface Flow Boundary Conditions in Modeling Land Subsidence Due to Fluid Withdrawal, *Ground Water*, 2004, Vol. 42(4), pp. 516–525, DOI: 10.1111/j.1745-6584.2004.tb02620.x.
6. Biot M. A., General Solutions of the Equations of Elasticity and Consolidation for a Porous Medium, *J. Applied Mechanics*, 1956, Vol. 23, pp. 91–96.
7. Geertsma J., Land Subsidence Above Compacting Oil and Gas Reservoirs, *J. Petroleum Technology*, 1973, Vol. 59, No. 6, pp. 734–744, <https://doi.org/10.2118/3730-PA>.
8. Hanssen R. F., *Radar Interferometry: Data Interpretation and Error Analysis*, New York; Boston; Dordrecht; London; Moscow: Kluwer Academic Publishers, 2001, 308 p., <https://doi.org/10.1007/0-306-47633-9>.
9. Mikhailov V., Kiseleva E., Dmitriev P., Golubev V., Smolyaninova E., Timoshkina E., On reconstruction of the three displacement vector components from SAR LOS displacements for oil and gas producing fields, *Procedia Technology*, 2014, Vol. 16, pp. 385–393, DOI: 10.1016/j.protcy.2014.10.104.