

УДК 550.31

## ОЦЕНКА ПОЛНОГО ВЕКТОРА СМЕЩЕНИЙ ЗЕМНОЙ ПОВЕРХНОСТИ И ТЕХНОГЕННЫХ ОБЪЕКТОВ ПО ДАННЫМ РАДАРНОЙ СПУТНИКОВОЙ ИНТЕРФЕРОМЕТРИИ ДЛЯ ОБЛАСТЕЙ РАЗРАБОТКИ МЕСТОРОЖДЕНИЙ НЕФТИ И ГАЗА

© 2012 г. В.О. Михайлов, Е.А. Киселева, П.Н. Дмитриев, В.И. Голубев, Е.И. Смольянинова, Е.П. Тимошкина

*Институт физики Земли им. О.Ю. Шмидта РАН, г. Москва, Россия*

При мониторинге смещений земной поверхности или техногенных объектов с применением спутниковых радаров с синтезированной апертурой (РСА-интерферометрия) определяют временные ряды и средние скорости смещений в направлении на спутник. Для оценки истинного направления и величины вектора смещений или его трех компонент – на север, восток и по вертикали – необходимо привлекать дополнительную информацию, например, о физической природе наблюдаемых смещений.

Предложен метод оценки трех компонент вектора смещений земной поверхности для областей разработки нефтяных и газовых месторождений, базирующийся на предположении, что смещения вызваны снижением или ростом давления в разрабатываемом пространстве в результате отбора углеводородов или закачки вытесняющей жидкости.

Приведен пример оценки смещений в направлении на спутник и восстановления полного вектора с использованием данных по Ромашкинскому нефтяному месторождению в окрестности г. Альметьевска.

**Ключевые слова:** спутниковая радарная интерферометрия, просадки, месторождения нефти и газа, мониторинг, компоненты вектора смещений.

### Введение. Постановка задачи

При проведении мониторинга областей разработки месторождений нефти и газа часто ставится задача оценки смещений земной поверхности, значительные просадки которой могут приводить к деформациям зданий и сооружений инфраструктуры. Кроме того, данные о смещениях содержат важную информацию о том, насколько эффективно удается поддерживать пластовое давление, откуда идет отбор углеводородов и в каком направлении происходит фильтрация закачиваемой в пласт жидкости.

Для измерения смещений выполняются повторные геодезические измерения, в частности определяются координаты специально оборудованных реперов с применением глобальных навигационных спутниковых систем (ГНСС) ГЛОНАСС и/или *GPS*. Спутниковые системы позволяют наиболее точно определять смещения на север и восток. Для определения вертикальных смещений необходимы достаточно длительные многократные измерения. Часто проводят повторные нивелировки вдоль профилей, также проходящих по специально установленным реперам. В этом случае определяют вертикальные смещения реперов за время между повторными проходами относительно некоторого репера, который принимается за точку отсчета и считается неподвижным. Оба эти метода достаточно трудоемки, и количество пунктов измерений обычно не превосходит нескольких десятков.

В последние годы все чаще проводится анализ данных спутниковых съемок радами с синтезированной апертурой (спутниковая РСА-интерферометрия или *SAR*). В

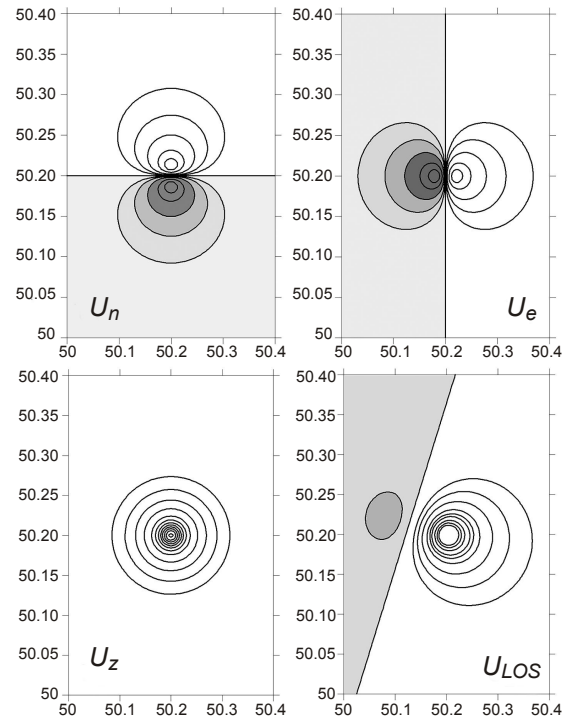
результате анализа пар или их серий снимков определяют смещения в направлении на спутник  $U_{LOS}$  ( $LOS$  от англ. *Line of Sight* – направление видения). При анализе пар снимков используется технология дифференциальной РСА-интерферометрии и определяется поле смещений за период между повторными спутниковыми съемками. При анализе серий снимков применяются различные модификации технологии устойчивых отражателей, в которых рассчитываются временные ряды смещений для отдельных устойчиво отражающих площадок и средние скорости смещений за период, покрываемый снимками. Число устойчиво отражающих площадок в пределах одного снимка для областей с развитой промышленной инфраструктурой или городской застройкой может достигать многих десятков тысяч.

Оценке смещений в областях разработки нефтяных и газовых месторождений с применением РСА-интерферометрии посвящена обширная литература. Одной из первых была работа [Fielding, Blom, Goldstein, 1998], авторами которой на основе парных интерферограмм были зарегистрированы просадки в области месторождений Лостхиллс и Берлиндж (США) происходящие со средней скоростью до 40 см/год. Ряд работ выполнен для территории СНГ. На основе анализа парных интерферограмм для месторождений Кандым и Гумбулак (Республика Узбекистан) были построены графики смещений во времени [Кантемиров, 2011]. В работе [Филатов, Евтюшкин, Васильев, 2011] методом устойчивых отражателей оценены смещения отдельных отражающих площадок в районе Самотлорского месторождения.

Надо помнить, что все результаты повторных измерений содержат различного рода погрешности. В частности, в спутниковых данных (как РСА-интерферометрии, так и ГНСС) важно подавить эффекты, вызванные атмосферными помехами. Точность оценок по данным спутниковой интерферометрии зависит от детальности цифровой модели рельефа, расстояния между орбитами, с которых производилась повторная съемка, от изменений отражающих свойств поверхности в период между снимками, например, за счет динамики растительного или снежного покрова. Для выработки правильной стратегии подавления помех и выявления возникающих артефактов желательнее проводить увязку всех имеющихся данных мониторинга. Трудность построения согласованного поля смещений земной поверхности состоит в том, что все перечисленные выше измерения производятся в разных пунктах, в разные моменты времени, с разной точностью и главное, измеряются разные величины. Так, с помощью ГНСС наиболее точно фиксируются смещения на север и восток. С помощью РСА-интерферометрии оценивают проекцию вектора смещений на направление на спутник ( $U_{LOS}$ ). Повторные нивелировки дают вертикальные смещения относительно некоторого репера. В результате, непосредственно сопоставить все названные данные невозможно. Для иллюстрации этого утверждения рассмотрим простой пример смещения земной поверхности в результате увеличения давления в небольшой сферической области, расположенной на глубине 1 км (рис. 1).

Приведенный пример показывает, что по точечным данным ГНСС о смещениях на север и восток положение источника деформаций можно определить, только если сеть реперов достаточно густая и покрывает области как положительных, так и отрицательных смещений. По данным спутниковой интерферометрии ( $U_{LOS}$ ), аномалия не изометричная, максимум смещений сдвинут в направлении на спутник относительно истинного положения источника деформаций и имеется область смещений противоположного знака. Если, как это не редко делается, принять, что смещения в основном происходят по вертикали, то будет сделано ошибочное заключение, что наряду с областью поднятия обнаруживается и область проседания. Повторные нивелировки дают информацию о вертикальных смещениях, если точка отсчета выбрана в области действительно малых смещений. Однако положение источника удастся определить, только если профиль пройдет над ним или если сеть профилей достаточно густая.

**Рис. 1.** Смещения земной поверхности (в условных единицах) в результате увеличения давления в малой области, расположенной на глубине 1 км.  $U_n$ ,  $U_e$  и  $U_z$  – смещения соответственно на север, восток и по вертикали (положительные – вверх).  $U_{LOS}$  – смещения в направлении на спутник при съемке с нисходящего трека с азимутом орбиты  $197^\circ$  (положительные – к спутнику). Направление на спутник имеет наклон к вертикали  $20.4^\circ$  и азимут  $287^\circ$ , что соответствует съемке с нисходящего трека спутника *ENVISAT*. Области отрицательных значений выделены серой заливкой. Более темная заливка соответствует большим смещениям. Горизонтальная ось – долгота,  $^\circ$  в.д.; вертикальная – широта,  $^\circ$  с.ш. Соотношение вертикального и горизонтального масштаба выбрано так, чтобы линейный масштаб по осям был одинаковым



Допустим, что в некотором пункте имеются два измерения смещений на север  $U_n$  и восток  $U_e$  с помощью спутниковых систем *GPS* или ГЛОНАСС и смещение в направлении на спутник  $U_{LOS}$  (положительные – к спутнику) по данным радарной спутниковой интерферометрии. Согласно [Hanssen, 2001] эти величины связаны уравнением

$$U_{LOS} = U_z \cos \theta - \sin \theta (U_n \cos \beta + U_e \sin \beta), \quad (1)$$

где  $U_z$  – смещения по вертикали (положительные – вверх);  $\theta$  – угол отклонения направления видения от вертикали;  $\beta$  – азимут направления видения. Тогда, из уравнения (1) можно определить  $U_z$ .

Однако применить данный подход мешают два обстоятельства. Во-первых, пункты повторных геодезических наблюдений редко совпадают с положением устойчивых отражателей, найденных по результатам спутниковой интерферометрии. Положение устойчивых отражателей трудно определить заранее. Окажется ли некоторый элемент строения или инфраструктуры устойчивым отражателем, зависит от материала и ориентации отражающей поверхности, от изменений в период съемки снежного и растительного покрова. Существенную роль играет количество анализируемых радарных снимков и длительность покрываемого ими временного интервала, атмосферные условия, при которых проводилась съемка, азимут орбиты, параметры, принятые при обработке снимков, и другие факторы. Гарантировать получение устойчивого отражения в заданной точке можно только путем установки в ней уголкового отражателя.

Второе обстоятельство состоит в том, что число устойчиво отражающих площадок в районе промышленных объектов с развитой инфраструктурой обычно во многие сотни и тысячи раз превосходит число геодезических пунктов, поэтому с помощью данных спутниковой геодезии можно перевести в значения вертикальных смещений только малую часть смещений, определенных в точках устойчивых отражателей.

Часто получают РСА-изображения одной и той же территории с двух орбит – восходящей и нисходящей. В этом случае имеются два уравнения вида (1) с различными углами  $\beta$ . Тем не менее, поскольку неизвестных компонент вектора смещений три, двух уравнений недостаточно для однозначного определения полного вектора.

Наиболее эффективный способ решения данной проблемы – привлечение информации о природе наблюдаемых смещений. Например, для оползней и ледников можно применить предположение, что смещение происходит вниз по склону. Различные варианты решения этой задачи рассмотрены в [Дмитриев и др., 2012]. Для областей землетрясений можно поставить задачу определения геометрии поверхности разрыва и поля смещений на ней по комплексу наземных и спутниковых данных (см. например, [Михайлов и др., 2010]). Для областей разработки нефтяных и газовых месторождений естественно предположить, что смещения земной поверхности происходят в результате отбора углеводородов или закачки вытесняющей жидкости, т.е. в результате изменений давления в некотором пористом пространстве, которые сопровождаются его расширением или сжатием. Предлагаемый метод построения аппроксимации поля смещений в направлении на спутник и расчета трех компонент вектора смещений, основан на этом предположении.

### **Определение вектора смещений земной поверхности по его проекции на направление на спутник в областях разработки нефтяных и газовых месторождений**

Рассмотрим задачу о смещении земной поверхности в результате изменения давления в некотором объеме под ней. Представим этот объем (состоящий, возможно, из нескольких несвязанных областей) в виде набора малых элементарных объемов. В результате отбора и закачки, производимых некоторой системой скважин, в каждом из этих объемов происходит увеличение или падение давления. Если принять для описания верхней части земной коры модель изотропного упругого полупространства, то суммарное смещение поверхности будет равно сумме смещений в результате расширения или сжатия каждого элементарного объема. Если также допустить, что среда является однородной, то для расчета смещений земной поверхности можно использовать известные аналитические решения. Отметим, что формулы для упругой и вязкоупругой среды совершенно аналогичны с точностью до коэффициентов, которые для вязкоупругой среды зависят от времени [Fokker, Orlic, 2006].

Рассмотрим однородное упругое полупространство  $z \geq 0$ , для которого плоскость  $z = 0$  является свободной поверхностью (ось  $Oz$  направлена вниз). Пусть напряжения в среде возникают в результате расширения или сжатия малого объема  $\varepsilon_0(\vec{r})$ , где  $\vec{r}$  – радиус-вектор, направленный от центра объема в точку на поверхности полупространства. Решение задачи для полупространства базируется на решении для бесконечного пространства (см., например, [Тимошенко, Гудьер, 1979]), согласно которому поле смещений  $u(\vec{r})$  находится из уравнения

$$4\pi u(\vec{r}) = -\nabla\varphi, \quad (2)$$

где потенциал  $\varphi$  удовлетворяет уравнению Пуассона:  $\Delta\varphi = -4\pi \frac{1+\nu}{1-\nu} \varepsilon_0$  ( $\nu$  – коэффициент Пуассона). Следовательно, решение уравнения (2) может быть записано в интегральной форме:

$$\varphi(\vec{r}) = \frac{1+\nu}{1-\nu} \int_V \frac{\varepsilon_0(\vec{r}') d\vec{r}'}{|\vec{r} - \vec{r}'|}, \quad (3)$$

где интегрирование ведется по объему областей расширения-сжатия, расположенных в области  $z \geq 0$ .

В работе [Mindlin, Cheng, 1950] доказано, что для получения поля смещений в упругом полупространстве со свободной поверхностью надо просто умножить поле смещений в бесконечном пространстве на коэффициент  $4(1-\nu)$ . Детальный анализ этого

решения выполнен, например, в [Davis, 2003]. Для дальнейшего изложения мы ограничимся рассмотрением поля смещений на поверхности полупространства. Для одиночного центра растяжения  $\varepsilon_0(\vec{r}) = S\delta(\vec{r} - \vec{r}_0)$ , расположенного в точке  $\vec{r}_0 = (x_j, y_j, z_j)$ , компоненты поля смещений имеют вид:

$$\begin{aligned} U_x(x_i, y_i, 0) &= \frac{(1+\nu)S}{\pi} \frac{x_i - x_j}{R^3}, \\ U_y(x, y, 0) &= \frac{(1+\nu)S}{\pi} \frac{y_i - y_j}{R^3}, \\ U_z(x, y, 0) &= \frac{(1+\nu)S}{\pi} \frac{z_j}{R^3}, \end{aligned} \quad (4)$$

где  $R^2 = (x_i - x_j)^2 + (y_i - y_j)^2 + z_j^2$ .

Компоненты вектора смещений на поверхности полупространства в результате изменения давления в некотором объеме  $V$  (возможно состоящем из отдельных подобластей) сводится к интегрированию по этому объему функций (4). При этом, поскольку величина расширения/сжатия  $S$  в общем меняется в пределах объема  $V$ , она входит в эти уравнения как функция пространственных координат, например для смещений в направлении на спутник  $U_{LOS}$ , с учетом формулы (1), получаем:

$$U_{LOS}(x, y, 0) = \frac{(1+\nu)}{\pi} \int_V \frac{S(\xi, \eta, \zeta) [(z - \zeta) \cos \theta - \sin \theta ((y - \eta) \cos \beta + (x - \xi) \sin \beta)]}{((x - \xi)^2 + (y - \eta)^2 + (z - \zeta)^2)^{3/2}} d\xi d\eta d\zeta, \quad (5)$$

где  $(\xi, \eta, \zeta)$  – переменные интегрирования по объему  $V$ .

Уравнения (4) с точностью до коэффициентов совпадают с уравнениями для гравитационного потенциала, в которые в качестве множителей входят масса и гравитационная постоянная. Для расширяющейся области в уравнения (4) входят коэффициент Пуассона и изменение объема  $S$ . Согласно [Geertsma, 1973], изменение объема определяется коэффициентами сжимаемости, изменением давления и объемом области расширения/сжатия. Данная аналогия позволяет получить замкнутые выражения для смещений, вызванных изменением давления в областях простой формы (цилиндр, прямоугольный параллелепипед, полубесконечный пласт и т.п. [Кузьмин, Жуков, 2004]), и использовать для анализа и решения задачи хорошо разработанный аппарат теории потенциала.

Одним из методов решения задачи является нахождение функции  $S(x, y, z)$  из уравнения (5) и расчет всех компонент векторов смещений по уравнениям (4). Уравнение (5) являются интегральными уравнениями типа свертки. Задача нахождения функции  $S$  по функции  $U_{LOS}$  в общем случае не имеет единственности, а в классах единственности является устойчивой и требует применения различных методов регуляризации [Стрехов, 1980]. Для построения классов единственности необходимо привлечение дополнительной информации. В частности, задача может быть решена в рамках модели месторождения. Для этого надо задать геометрию продуктивных пластов, распределение параметров (пористости, проницаемости, нефтегазонасыщенности), расположение скважин, интервалы глубин, периоды времени и объемы отбора или закачки и многое другое. Если все необходимые данные известны, то можно рассчитать компоненты вектора смещений на земной поверхности и смещения на спутник. После этого может быть поставлена задача определения или уточнения части параметров модели из условия наилучшего согласования расчетных смещений и всех имеющихся данных мониторинга. В любом случае, эта задача будет решена приближенно. Это связано с применением упрощенных реологических моделей среды, дискретизации пространства, в условиях неполного знания строения и свойств коллекторов, положения трещин и разломов, их проницаемости и много другого. Кроме того, решение такой задачи очень трудоемко в отношении машинного времени.

Другое решение, которому посвящена данная статья, основано на том, что поле смещения в упругом полупространстве в результате изменения объема в некоторых его областях, вне этих областей, там, где  $\varepsilon_0(\vec{r}) = 0$ , удовлетворяет уравнению Лапласа, т.е. является потенциальной функцией. Из теоремы Стокса следует, что если потенциал  $\varphi$  или его производные (4), или какая-либо их линейная комбинация, например, вида (1), известны на некоторой поверхности, охватывающей все области расширения-сжатия (в частности, и поверхность  $z=0$ ), то и потенциал, и его производные могут быть однозначно определены во всей внешней области этого пространства, включая ограничивающую его поверхность. Действительно, в зависимости от того, какие данные заданы на поверхности, рассматриваемая задача является внешней задачей Дирихле, или Неймана или смешанной краевой задачей, которые для гармонических функций имеют единственное решение [Идельсон, 1932]. Это позволяет решить задачу без знания истинного строения месторождения и процесса его эксплуатации.

В частности, любое потенциальное поле, заданное на некоторой поверхности в узлах пространственной сетки, можно аппроксимировать с помощью систем элементарных источников различного типа, расположенных на некоторой нижележащей поверхности [Bjerhammar, 1962; Аронов, 1963,] или на нескольких поверхностях [Аронов и др., 1977]. Выбор типа источников и их расположение становятся существенными лишь в случаях сильно неравномерных сетей наблюдений. В этих случаях для выбора типа источников и их расположения может быть использована аналогия между задачей подбора поля системами эквивалентных источников и оптимальной фильтрацией по Колмогорову–Винеру [Гордин, Михайлов, Михайлов, 1980].

В задаче о смещении поверхности в результате изменения пластового давления для аппроксимации поля смещений на поверхности также можно использовать достаточно простые конструкции, например сферические объемы, расположенные на глубине верхнего разрабатываемого слоя или на средней глубине разрабатываемой многопластовой залежи. Если глубина горизонта меняется незначительно по сравнению с ее средней величиной, то источники можно разместить на одном уровне. При этом по аналогии с потенциальными полями можно показать, что любое поле смещений, описываемое уравнениями (4), сколь угодно точно аппроксимируется распределением малых объемов, расположенных на любом уровне, в том числе на горизонтальной плоскости.

Используя аналогию с гравитационным полем, можно учесть рельеф земной поверхности в точках  $(x_i, y_i, z_i)$ , где заданы смещения. В этом случае расстояние надо считать, что  $R^2 = (x_i - x_j)^2 + (y_i - y_j)^2 + (z_j - z_i)^2$ , и заменить последнюю формулу в (4) на

$$U_z(x, y, 0) = \frac{(1 + \nu)S}{\pi} \frac{z_j - z_i}{R^3}. \quad (6)$$

Отметим еще раз, что при таком подходе для определения компонент вектора смещений нет необходимости знать геометрию залежи, распределение пористости или проницаемости, дебиты скважин и т.д.

### Метод решения задачи

Поскольку наземные и спутниковые измерения покрывают различные интервалы времени, далее величиной  $U$  будем обозначать средние скорости смещений, полагая, что они характеризуют один и тот же интервал времени. Пусть по данным повторных наблюдений с применением ГНСС определены средние скорости смещений (в мм/год) на север и восток за некоторый интервал времени на  $k$  пунктах:  $\langle \lambda_i, \varphi_i, U_{n,i}, U_{e,i} \rangle$ ,  $i=1, 2, \dots, k$ . Пусть по результатам обработки данных РСА-интерферометрии определено  $m$  устой-

чиво отражающих площадок и определены средние скорости их смещения в направлении на спутник:  $\langle \lambda_j, \varphi_j, U_{LOS,j} \rangle$ ,  $j=1, 2, \dots, m$ . Пусть также вдоль системы из  $P$  профилей повторного нивелирования определены средние скорости вертикальных смещений:  $\langle \lambda_q^p, \varphi_q^p, W_q^p \rangle$ ,  $p=1, 2, \dots, P$ ,  $q=1, 2, \dots, Q_p$ , где  $Q_p$  – число точек на профиле с индексом  $p$ ;  $W_q^p$  – вертикальные смещения на каждом профиле, обычно определяемые относительно некоторого репера, который считается неподвижным (на каждом профиле может быть выбран свой “нулевой” репер).

Разместим под поверхностью наблюдений аппроксимирующую конструкцию. В качестве аппроксимирующих источников выберем малые сферические объемы, для которых смещения задаются формулами (4). По опыту решения аналогичных задач [Гордин, Михайлов, Михайлов, 1980] можно рекомендовать располагать источники под точками наблюдений на глубине, равной среднему расстоянию между точками. Выпишем систему уравнений для компонент вектора смещений с учетом топографии (формулы 6) или на плоской поверхности (формулы 4). В этих формулах под величиной  $S$  будем понимать среднюю скорость изменения объема. В силу того, что размеры области мониторинга обычно относительно невелики, далее кривизной Земли пренебрегаем, и расстояния вычисляем в декартовой системе координат с осью  $Ox$ , направленной на восток, осью  $Oy$  – на север; ось  $Oz$  направим вверх. Тогда расстояние по горизонтали между точками с географическими координатами  $(\lambda, \varphi)$  в восточном направлении и на север можно рассчитать по упрощенной формуле

$$x_i - x_j \cong \frac{\pi R_z (\lambda_i - \lambda_j) \cos\left(\frac{\varphi_i + \varphi_j}{2}\right)}{180}, \quad y_i - y_j \cong \pi R_z \frac{(\varphi_i - \varphi_j)}{180},$$

где  $R_z$  – экваториальный радиус Земли.

Определим неизвестные величины из условия минимума среднеквадратической невязки:

$$\begin{aligned} & \left\| U_{LOS}^{SAR} - U_{LOS}^{calc} \right\|_{L_2} + \frac{\sigma_{SAR}}{\sigma_{GNSS}} \left( \left\| U_n^{GNSS} - U_n^{calc} \right\|_{L_2} + \left\| U_e^{GNSS} - U_e^{calc} \right\|_{L_2} \right) + \\ & + \frac{\sigma_{SAR}}{\sigma_{lev}} \left( \left\| W_q^p - W_p^{q,calc} \right\|_{L_2} \right) = \min, \end{aligned} \quad (7)$$

которое сводится к системе линейных уравнений относительно средней скорости изменения объема  $S$ . Здесь  $\sigma_{SAR}$ ,  $\sigma_{GNSS}$  и  $\sigma_{lev}$  – среднеквадратические невязки оценки скоростей смещений по данным РСА-интерферометрии, спутниковой геодезии и повторных нивелировок, используемые для учета их различной точности. Индексы  $SAR$ ,  $GNSS$  и  $calc$  обозначают величины, определенные по данным РСА-интерферометрии, спутниковой геодезии и соответствующие величины, вычисленные по аппроксимационной конструкции. Для сопоставления с данными повторных нивелировок скорости вертикальных смещений  $W_p^{q,calc}$  следует рассчитывать в точках расположения нивелировочных реперов и вычитать из них скорости смещений, рассчитанные в точке расположения того репера, который на профиле с индексом  $p$  принимался за неподвижный.

После нахождения средней скорости изменения объема  $S$  могут быть вычислены вертикальные и горизонтальные компоненты вектора скоростей смещений в точках расположения устойчивых отражателей или на регулярной сетке, что при большом количестве отражателей позволяет детально исследовать поле смещений в области разрабатываемого месторождения. Кроме того, можно вычислять и компоненты тензора деформаций, направление осей максимального растяжения и сжатия, наклоны и другие величины, используемые для оценки геодинамической опасности.

### Демонстрация возможностей метода на примере Ромашкинского месторождения

Ромашкинское месторождение расположено на территории Республики Татарстан в центральной части Восточно-Европейской платформы. Геодинамическая активность в районе в основном связана с карстовыми процессами и с влиянием длительного процесса разработки нефтяных месторождений. В последнее время все большее значение приобретает именно техногенный фактор [Гаятуллин, 2006], который проявляется в техногенной сейсмичности, активных деформациях земной поверхности. В связи с этим в 80-е годы прошлого столетия были начаты сейсмологические наблюдения, а с 1991 г. – повторные высокоточные нивелировки. В настоящее время зона наблюдений охватывает весь нефтяной район на юго-востоке Татарстана.

Для оценки смещений нами были использованы снимки спутника *Envisat*, сделанные с нисходящего трека 49D в период с апреля 2004 по октябрь 2005. Из одиннадцати имеющихся снимков по критериям когерентности были отобраны восемь (см. таблицу). К сожалению, мы не располагаем данными повторных геодезических измерений за этот период, в связи с чем далее ограничимся аппроксимацией только смещений по РСА-интерферометрии.

Аппроксимация осуществлялась малыми сферическими объемами по формулам (4). При этом объемы под точками, где были найдены устойчиво отражающие площадки, располагались на двух уровнях – 0.4 и 0.1 км. В работе [Гордин, Михайлов, Михайлов, 1980] было показано, что при надлежащем выборе автокорреляционных функций полезного сигнала и помехи подбор на двух уровнях аналогичен оптимальной фильтрации по Колмогорову–Винеру.

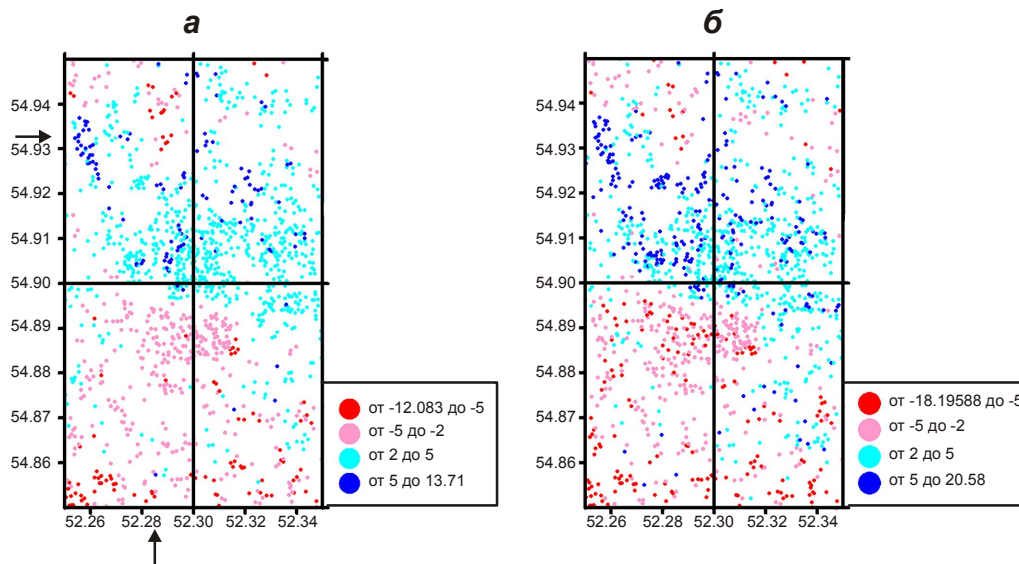
Радарные снимки со спутника *Envisat* (трек 49 D, нисходящий), отобранные для изучения деформаций на территории Ромашкинского геодинамического полигона

№	Начало съемки, дата/время	Окончание съемки, дата/время
1	2004-04-16/ 07:03:05.44	2004-04-16/ 07:03:23.44
2	2004-07-30/ 07:03:12.14	2004-07-30/ 07:03:30.14
3	2004-10-08/ 07:03:10.12	2004-10-08/ 07:03:28.12
4	2004-12-17/ 07:03:05.24	2004-12-17/ 07:03:23.24
5	2005-02-25/ 07:03:05.50	2005-02-25/ 07:03:23.50
6	2005-08-19/ 07:03:09.22	2005-08-19/ 07:03:27.22
7	2005-09-23/ 07:03:09.19	2005-09-23/ 07:03:27.19
8	2005-10-28/ 07:03:11.10	2005-10-28/ 07:03:29.10

Отношение амплитуд изменения объемов на двух уровнях аналогично отношению среднеквадратических амплитуд полезного сигнала и помехи, а глубина до источников связана с их радиусами автокорреляции. Отношение изменения объемов, расположенных на верхнем и нижнем уровнях под одним и тем же отражателем, было задано постоянным – 1:100. При этом расчет вертикальных смещений велся только от объемов нижнего уровня, имитирующего полезный сигнал. Такая конструкция позволяет отфильтровать высокочастотную составляющую, имеющую небольшую по сравнению с полезным сигналом амплитуду –  $\sim 1/10$ .

Средние скорости смещений устойчиво отражающих площадок за период, покрываемый съемкой, в области размером  $0.1^\circ \times 0.1^\circ$  с центром в г. Альметьевск на Ромашкинском месторождении показаны на рис. 2, а. Расчеты выполнены с применением программного пакета *StaMPS* [Delft ..., 2008], в котором реализован метод, представленный в работе [Hooper, Segall, Zebker, 2007].

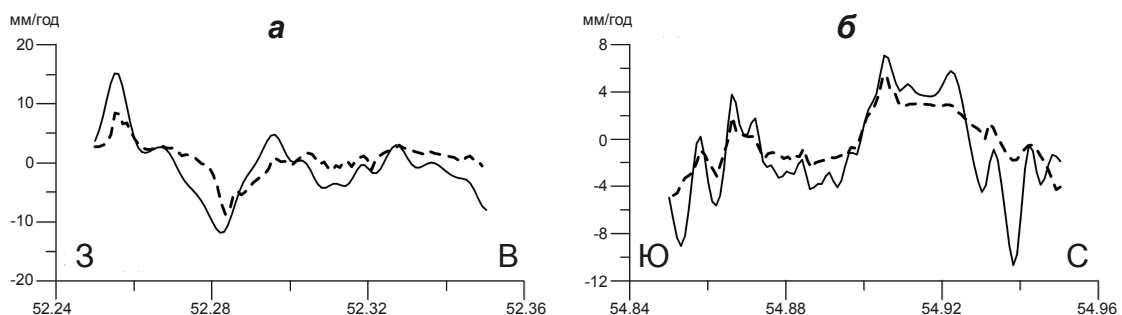




**Рис. 2.** Средние скорости смещения земной поверхности в районе г. Альметьевск на Ромашкинском месторождении в период с апреля 2004 г. по октябрь 2005 г.: *а* – средние скорости смещения в направлении на спутник по данным РСА-интерферометрии; *б* – вертикальные скорости смещения, рассчитанные по ним. Альметьевск расположен в центре снимка в области пересечения географических координатных линий. Стрелками возле горизонтальной и вертикальной осей на *а* отмечено положение профилей, вдоль которых проводится дальнейший анализ

В поле скоростей смещений, прежде всего, обращает на себя внимание резкая граница между областью движения на спутник и от спутника, проходящая южнее Альметьевска, которая совпадает с границей жилой и промышленной зон города. Поле средних скоростей смещений  $U_{LOS}$  (рис. 2, *а*) было пересчитано в поле вертикальных составляющих скоростей смещений  $U_z$  (рис. 2, *б*). Внешне эти схемы схожи, но при детальном анализе смещений вдоль профилей (рис. 3), проявляются важные различия.

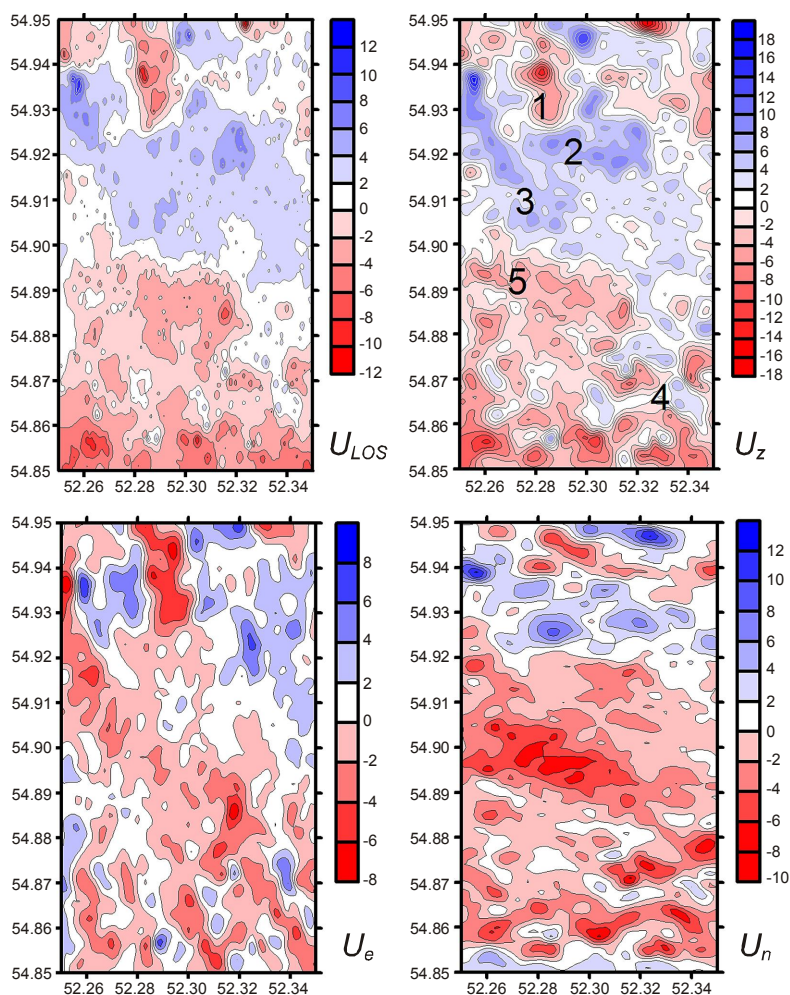
Прежде всего, максимальная амплитуда вектора скорости смещений примерно в 1.5 раза больше его проекции на направление видения. Во-вторых, на профиле идущем с запада на восток (рис. 3, *а*), наблюдается региональный перекосяк в поле смещений на спутник. Из-за смещения аномалий в проекции на спутник на отдельных участках ход кривых существенно различается. Важно иметь в виду, что там, где вертикальное смещение и смещение на спутник заметно расходятся, значительным оказывается смещение в горизонтальном направлении.



**Рис. 3.** Смещения в направлении на спутник (штриховая линия) и рассчитанные по ним смещения по вертикали (сплошная линия) вдоль двух профилей, пересекающих исследуемую область в направлениях запад–восток (*а*) и юг–север (*б*). Положение профилей показано стрелками на рис. 2, *а*

Наиболее четко видны различия в смещениях на спутник и по вертикали на картах (рис. 4), построенных путем интерполяции средних скоростей смещений, приведенных на рис. 2. В области, обозначенной на схеме  $U_z$  цифрой 1, отчетливо выявляется область интенсивной просадки, окруженная областью поднятия 2. Область поднятия 3 оказывается единой и четко прослеживается через всю карту в направлении на ЮВ. Южнее этой области происходит резкая смена знака движения (цифра 5). Область просядок 5 занимает обширную площадь, но в ее пределах обнаруживаются и небольшие локальные поднятия (в районе цифры 4). Карта вертикальных скоростей смещений заметно более информативна, чем карта скоростей смещений в направлении на спутник  $U_{LOS}$ . Многие из перечисленных особенностей трудно проследить по схеме скоростей смещений в направлении на спутник.

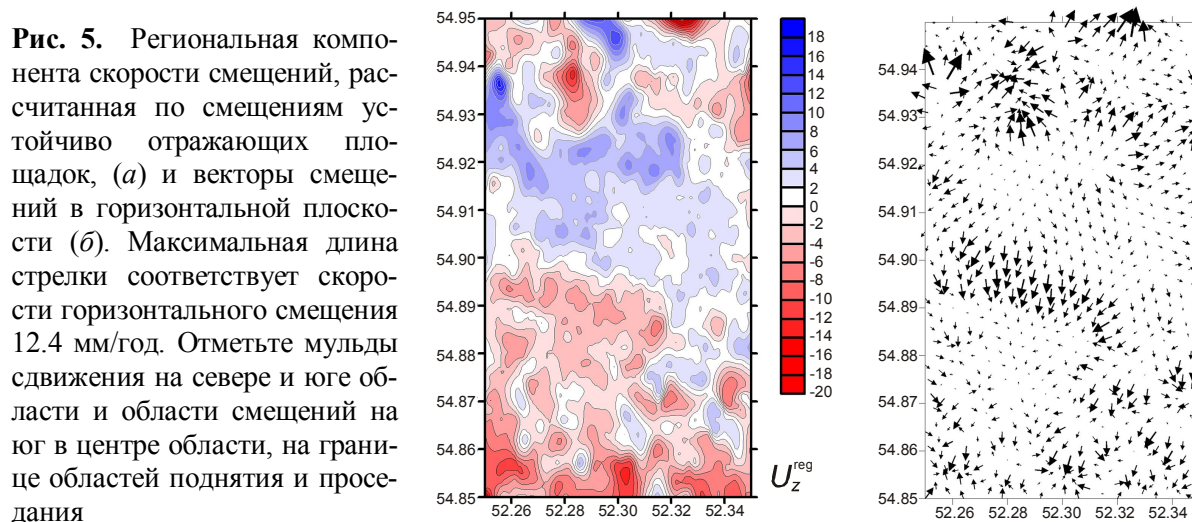
В нижнем ряду рис. 4 показаны компоненты скоростей смещений на восток и на север. Скорости смещений на восток достигают 10 мм/год, скорости смещений на север больше – до 14 мм/год. Отметим, что в ряде работ полагают, что поскольку смещения на север сильно подавляются в проекции на направление видения, то их можно считать равными нулю. Приведенный пример показывает, что такое предположение может приводить к значительным ошибкам.



**Рис. 4.** Карты скоростей смещений, построенные путем интерполяции скоростей смещений отдельных устойчиво отражающих площадок, показанных на рис. 2

$U_{LOS}$  – скорости смещения к спутнику,  $U_z$  – соответствующие им скорости смещения по вертикали,  $U_e$  – к востоку,  $U_n$  – к северу

Отметим также, что оценки смещений содержат погрешности, в основном, высокочастотные шумы. С применением аппроксимирующих конструкций можно выполнить фильтрацию высокочастотных составляющих и найти длиннопериодную компоненту смещений земной поверхности  $U_z^{reg}$  (рис. 5). В случае глубоких залежей эта компонента, свободная от связанных с неоднородным строением верхней части разреза локальных эффектов, может использоваться для исследования изменения давления на уровне залежи.



### Выводы

Предложен метод расчета всех компонент вектора смещений по данным РСА-интерферометрии о смещениях на спутник, применимый для областей разработки нефтяных и газовых месторождений. Метод основан на уравнениях, задающих смещения на поверхности упругого или вязкоупругого полупространства в результате изменения давления в областях заданной конфигурации. Метод численно реализован с использованием уравнений для малых сферических объемов, которые позволяют построить эффективный метод численного решения.

Предложенный метод позволяет строить поля смещений, согласованные с любыми данными повторных измерений (ГНСС, повторные нивелировки, РСА-интерферометрия). Работа метода продемонстрирована на примере анализа смещений в районе г. Альметьевска на Ромашкинском месторождении. Показано, что поле вертикальных смещений существенно отличаются от поля смещений в направлении видения, как по морфологии, так и по абсолютной величине. Скорости смещений в горизонтальном направлении достигают 12 мм/год. Полученные результаты показывают, что предположение о том, что скорости смещений на спутник равны смещениям по вертикали, также как и предположение о том, что смещениями на север можно пренебречь, могут приводить к существенным ошибкам.

### Благодарности

Работа выполнена при финансовой поддержке Министерства образования и науки Российской Федерации в рамках контракта № 16.515.11.5032. Данные спутниковой интерферометрии были предоставлены Европейским космическим агентством в рамках проекта категории CP1 #9664.

Авторы признательны доктору физико-математических наук Ю.О. Кузьмину и кандидату геолого-минералогических наук А.И. Никонову за полезное обсуждение.

### Литература

- Аронов В.И.* К вопросу о редуцировании аномалий силы тяжести // Геофизическая разведка. Вып. 14. М.: Гостоптехиздат, 1963. С.46–57.
- Аронов В.И., Кушнир Г.Ф., Михайлов Б.О., Михайлов В.О.* Алгоритм и программы интерполяции и фильтрации // Экспресс-информация ОЦНТИ ВИЭМС. Сер. Математические методы исследований в геологии. М., 1977. № 12. С.1–19.
- Гатиятуллин Р.Н., Залялов И.М., Кошуркин П.И., Кузьмин Ю.О., Рахматуллин М.Х.* Изучение современных деформационных и сейсмических процессов на Ромашкинском геодинамическом полигоне // Материалы Международной конференции “Изменяющаяся геологическая среда: пространственно-временные взаимодействия эндогенных и экзогенных процессов”. 2007. Т. 1. С.222–226.
- Гордин В.М., Михайлов Б.О., Михайлов В.О.* Физические аспекты аппроксимации и фильтрации потенциальных полей // Изв. АН СССР. Сер. Физика Земли. 1980. № 1. С.78–93.
- Дмитриев П.Н., Голубев В.И., Исаев Ю.С., Киселева Е.А., Михайлов В.О., Смольянинова Е.И.* Некоторые проблемы обработки и интерпретации данных спутниковой радарной интерферометрии на примере мониторинга оползневых процессов // Современные проблемы дистанционного зондирования Земли из космоса. 2012. Т. 9, № 2. С.130–144.
- Кантемиров Ю.И.* Космический мониторинг смещений земной поверхности на месторождениях Кандым и Гумбулак Республики Узбекистан по данным космических радарных съемок // Геоматика. 2011. № 1. С.72–79.
- Идельсон Н.И.* Теория потенциала и ее приложения к вопросам геофизики. М.; Л.: ПТИ, 1932. 348 с.
- Кузьмин Ю.О., Жуков В.С.* Современная геодинамика и вариации физических свойств горных пород. М.: МГГУ, 2004. 280 с.
- Михайлов В.О., Назарян А.Н., Смирнов В.Б., Диаман М., Шатино 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. РАН. Физика Земли. 2010. № 2. С.3–16.
- Страхов В.Н.* Трансформации потенциальных полей. Гл. 8 // Гравиразведка / Ред. Е.А. Мудрецова, К.Е. Веселов. М.: Недра, 1990. 607 с.
- Тимошенко С.П., Гудьер Дж.* Теория упругости. М.: Наука, 1979. 560 с.
- Филатов А.В., Евтюшкин А.В., Васильев Ю.В.* Определение смещений техногенных объектов на территории нефтяных месторождений методами радарной интерферометрии // Современные проблемы дистанционного зондирования Земли из космоса. 2011. Т. 8, № 2. С.157–165.
- Bjerhammar A.* Gravity Reduction to a Spherical Surface of Reference. Technical Report, Div. Geodesy. Stockholm: Royal Institute of Technology, 1962. 314 p.
- Davies J.H.* Elastic field in a semi-infinite solid due to thermal expansion or a coherently misfitting inclusion // J. Appl. Mech. 2003. V. 70. P.655–660.
- Delft object-oriented interferometric software user’s manual and technical documentation. Version 4.02 [Text] // Delft institute of earth observation and space systems; Delft university of Technology, 2008. 160 p.
- Fokker P.A., Orlic B.* Semi-Analytic Modelling of Subsidence // Mathematical Geology. 2006. V. 38, N 5. P.565–589. DOI: 10.1007/s11004-006-9034-z
- Fielding E.J., Blom R.G., Goldstein R.M.* Rapid subsidence over oil fields measured by SAR interferometry // Geophys. Res. Lett. 1998. V. 25, N.17. P.3215–3218.
- Geertsma J.* Land subsidence above compacting oil and gas reservoirs // J. Petr. Technol. 1973. V. 6, № 6. P.734–744.
- Hanssen R.F.* Radar Interferometry: Data Interpretation and Error Analysis. Dordrecht: Kluwer Academic Publ., 2001. 308 p.

Hooper A., Segall P., Zebker H. Persistent Scatterer InSAR for Crustal Deformation Analysis, with Application to Volcán Alcedo, Galápagos // J. Geophys. Res. 2007. V. 112, B07407, doi: 10.1029/2006JB004763.

Mindlin R.D., Cheng D.H. Thermo-Elastic Stress in the Semi-Infinite Solid // J. Applied Phys. 1950. V. 21. P. 931.

#### *Сведения об авторах*

**МИХАЙЛОВ Валентин Олегович** – доктор физико-математических наук, заведующий лабораторией, Институт физики Земли им. О.Ю. Шмидта РАН. 123995, ГСП-5, Москва, Д-242, ул. Большая Грузинская, д. 10, стр. 1. Тел.: (495) 254-85-77. E-mail: mikh@ifz.ru

**КИСЕЛЕВА Елена Алексеевна** – кандидат физико-математических наук, старший научный сотрудник, Институт физики Земли им. О.Ю. Шмидта РАН. 123995, ГСП-5, Москва, Д-242, ул. Большая Грузинская, д. 10, стр. 1. Тел.: (495) 254-85-77. E-mail: lenka-and-klim@yandex.ru

**ДМИТРИЕВ Павел Николаевич** – инженер, Институт физики Земли им. О.Ю. Шмидта РАН. 123995, ГСП-5, Москва, Д-242, ул. Большая Грузинская, д. 10, стр. 1. Тел.: (495) 254-85-77. E-mail: dmitrievpn@gmail.com

**ГОЛУБЕВ Василий Иванович** – инженер, Институт физики Земли им. О.Ю. Шмидта РАН. 123995, ГСП-5, Москва, Д-242, ул. Большая Грузинская, д. 10, стр. 1. Тел.: (495) 254-85-77. E-mail: w.golubev@mail.ru

**СМОЛЪЯНИНОВА Екатерина Ивановна** – кандидат геолого-минералогических наук, старший научный сотрудник, Институт физики Земли им. О.Ю. Шмидта РАН. 123995, ГСП-5, Москва, Д-242, ул. Большая Грузинская, д. 10, стр. 1. Тел.: (495) 254-85-77. E-mail: katsmol@mail.ru

**ТИМОШКИНА Елена Павловна** – кандидат физико-математических наук, старший научный сотрудник, Институт физики Земли им. О.Ю. Шмидта РАН. 123995, ГСП-5, Москва, Д-242, ул. Большая Грузинская, д. 10, стр. 1. Тел.: (495) 254-85-77. E-mail: elena@timoshkin.ru

## **ESTIMATION OF FULL VECTOR OF DISPLACEMENTS OF THE EARTH' SURFACE AND TECHNOGENIC OBJECTS BASED ON INSAR DATA APPLIED TO OIL AND GAS PRODUCTION AREAS**

V.O. Mikhailov, E.A. Kiseleva, P.N. Dmitriev, V.I. Golubev,  
E.I. Smolyaninova, E.P. Timoshkina

*Schmidt Institute of Physics of the Earth, Russian Academy of Sciences, Moscow, Russia*

**Abstract.** When monitoring displacements of the Earth' surface or technogenic objects using InSAR data, time series and mean velocities of displacements in the line-of-sight direction of a satellite are determined. To estimate all three components of displacements i.g. north, east and vertical components some additional information, such as that concerning physical origin of the displacements, is necessary. We put forward a method of estimation of three components of displacements assuming surface displacements being due to increase or decrease of pressure in the exploration layers resulting from petroleum extraction and fluid injection. Example of evaluation of displacements in the line-of-sight direction and determination of full displacement vector for Romashkino oil field near Almetievsk city is presented.

**Keywords:** satellite radar interferometry, subsidence, oil and gas fields, monitoring, three components of displacement vector.