

УДК 622.831.312

Антонов Владимир Александрович

доктор технических наук,
главный научный сотрудник,
Институт горного дела УрО РАН,
620075, г. Екатеринбург,
ул. Мамина-Сибиряка, 58
e-mail: Antonov@igduran.ru

**МОДЕЛИ ГОРИЗОНТАЛЬНОГО
ПЕРЕМЕЩЕНИЯ И ДЕФОРМАЦИИ
БЛОКОВ ЗЕМНОЙ ПОВЕРХНОСТИ***Аннотация:*

Изложены теоретические положения в области построения и аналитического формирования функционально-факторных моделей, отображающих горизонтальное перемещение и деформацию блоков земной поверхности на обрабатываемых или законсервированных месторождениях полезных ископаемых. Модели созданы, исходя из представлений о блоках по пространственным ограничениям их горизонтальных размеров и упругих свойств в иерархической мозаичной структуре горных пород. В них учтено плоское вращательное и поступательное векторное перемещение точек локализованных участков земной поверхности одного, а также двух смежных блоков. Кинематические параметры перемещений выделенного блока рассчитаны методами приближений параболической вершины и наименьшей суммы квадратов их невязок с экспериментально определенными векторами перемещений маркеров. По расчетным формулам и модельным соотношениям выявлены связи кинематических параметров вращения и поступательного сдвижения. В бинарной модели перемещения смежных блоков вклад перемещений каждого из них регулируется весовой квазиступенчатой функцией с обозначенной шириной зоны межблочного контакта. В результате дифференцирования данных перемещений получены аналитические выражения площадных линейных и угловых деформаций. По результатам анализа суммарной деформации установлены закономерности ее площадного распределения, локализованного в основном в зоне межблочного контакта. Сформированы правила и количественные критерии, по которым в заданной точке средней линии контактной зоны определяется следующее состояние деформации: сжатие, ее компенсация или расширение. Приведены примеры моделирования перемещений и деформаций, на которых показана возможность его использования в интерпретации наблюдаемого перемещения маркеров земной поверхности по данным спутниковой навигации GPS. В связи с этим даны рекомендации практического применения моделей.

Ключевые слова: блок земной поверхности, вектор перемещения, модель, вращение, поступательное сдвижение, оптимизация модельных параметров, деформация, закономерность

DOI: 10.25635/2313-1586.2020.01.104

Antonov Vladimir A.

Doctor of Technical Sciences,
Chief Researcher,
The Institute of Mining UB RAS,
620075 Ekaterinburg,
58 Mamina-Sibiryaka st.
e-mail: Antonov@igduran.ru

**MODELS OF HORIZONTAL MOVEMENT
AND DEFORMATION OF EARTH'S
SURFACE BLOCKS***Abstract:*

Theoretical provisions in the field of construction and analytical formation of functional factor models that display horizontal displacement and deformation of blocks of the earth's surface on the mined or preserved mineral deposits are presented. The models were created based on representations of blocks based on spatial restrictions of their horizontal dimensions and elastic properties in the hierarchical mosaic structure of rocks. They consider the rotational and translational vector movement of points on the earth's surface of one or two adjacent blocks.

The travel-time attributes of the block movement were calculated with the methods of approximating the parabolic vertex and the least square sum of residuals with experimentally determined marker moving vectors. Based on the rating formulas and model correlations the connection of kinematic parameters of rotation and translator motion has been established.

In the binary model of adjacent blocks, the contribution of their separate movement is regulated by quazi-step weighting function with given dimension of block contact zone. Based on moving data differencing, the analytical expressions for linear and angular area deformations are obtained. After analysis of the total deformation, the regularities of its area distribution, localized mainly in the block contact zone. The paper contains rules and quantitative criteria, according to which the following deformation state is to note at the medial point of the contact zone line: pressure, compensation or extension. Examples of movement and deformation modelling are given, on which we can see the possibility of its use for the interpretation of the moving of the earth's surface markers, noticed due the GPS satellite navigation data. Recommendations for practical application of the models are given.

Keywords: Block of the earth's surface, displacement vector, model, rotation, translational motion, model parameter optimization, deformation, regularity

Введение

Важнейшей проблемой прогноза напряженного состояния земной поверхности горных пород, вмещающих обрабатываемое или законсервированное месторождение полезных ископаемых, является создание достоверных моделей их перемещений и сопутствующих деформаций с использованием мониторинговой системы GPS-навигации, фиксирующей векторы горизонтальных перемещений маркеров поверхности, установленных в разных ее точках [1]. Такие модели необходимы для предупреждения возможных обрушений горных пород в зонах повышенной деформации, принятия соответствующих решений по безопасному ведению горных работ, возведению и содержанию техногенных объектов.

Достоверность и прогнозная эффективность моделей определяется методологией их построения, включая отображение происходящих кинематических процессов на земной поверхности с учетом мозаично-иерархической блочной структуры породного массива и соответствующей пространственной неоднородности его упругих свойств. Однако, даже при наличии признаков таких структур в кластерных зонах с разнонаправленными векторами перемещений маркеров, известные модели строят цифровыми методами однородной локальной интерполяции по представлениям о земной поверхности как сплошной пластично-упругой среде [2 – 5]. Поэтому в ее перемещениях, рассчитанных по соответствующим методикам конечных элементов, крайгинга, обратных расстояний, не отражаются закономерности и связи, свойственные блочной структуре горного массива и необходимые для экстраполяции перемещений и расчета деформации горных пород в прогнозируемых зонах. Возможности использования здесь линейной полиномиальной регрессии также ограничены из-за формализованного построения моделей и непредсказуемости полученных результатов.

В исследовании [6] показано, что данная проблема эффективно решается с применением методологии функционально-факторного моделирования, включающей представления о блоках земной поверхности по пространственным ограничениям их горизонтальных размеров и упругих свойств в иерархической мозаичной структуре горных пород, а также функциональное описание их перемещений. В данной статье приведены результаты моделирования перемещений на одном выделенном и на двух смежных блоках. На основе анализа бинарной модели двух блоков проведены расчеты и выявлены закономерности формирования деформаций, возникающих в зонах межблочных контактов.

Модель перемещения блока

Под блоком земной поверхности горных пород понимается ее локальный участок как ячейка в мозаичной иерархии их условного разделения по признаку дискретности упругих свойств, ограниченная по периметру зонами структурной и литологической неоднородности (крупные трещины, рыхлые пески и т. д.), в пределах которой все точки поверхности охвачены жесткими горизонтальными связями. Отмеченный таким образом блок, взаимодействуя с окружающими его смежными блоками, перемещается путем вращения и поступательного сдвижения.

Полагая, что в пределах месторождения полезного ископаемого размер блока земной поверхности не превышает 5 км, допускаем перемещение его точек в плоскости. Формирование вектора U горизонтального трендового перемещения каждой точки блока, выделенного на фоне случайных короткопериодных колебаний, описано в работе [6]. Вектор перемещения точки представляется в планиметрической декартовой системе координат x и y , направленных, соответственно, на восток и север, его следующими проекциями U_x и U_y :

$$U_x = U_c \cos \alpha - (y - y_{\text{ц}}) \Delta \varphi; \quad U_y = U_c \sin \alpha + (x - x_{\text{ц}}) \Delta \varphi,$$

где U_c – модуль вектора поступательного сдвижения всех точек блока; α – угол между направлением сдвижения и осью x ; $\Delta\varphi$ – угол вращения блока; $x_{ц}, y_{ц}$ – координаты центра его вращения, которое передается по земной поверхности жесткими упругими связями. Поэтому центр вращения располагается в пределах площади блока.

Отмеченные кинематические параметры определяются путем сравнения модельных перемещений с экспериментально наблюдаемыми проекциями $U_{xэ}, U_{yэ}$ перемещений маркеров. Оптимальные значения параметров рассчитываются методом наименьших квадратов полученных отклонений и методом приближений параболической вершины (МППВ) [7]. Учитывая, что проекции перемещения маркеров выражаются разностями конечных x_k, y_k и начальных x_n, y_n их координат, выведены следующие формулы расчета оптимального положения центра (Ц) вращения:

$$x_{ц} = - \frac{y_k - y_n - x_n \Delta\varphi - U_c \sin \alpha}{\Delta\varphi}; \quad y_{ц} = \frac{x_k - x_n + y_n \Delta\varphi - U_c \cos \alpha}{\Delta\varphi},$$

где угол $\Delta\varphi$, рассчитанный МППВ, является также оптимальным. Черта над координатами обозначает усреднение по количеству маркеров. Следует отметить, что изменение параметров поступательного сдвижения U_c, α приводит к смещению оптимальных координат центра Ц, но угол $\Delta\varphi$ и распределение модельных перемещений точек блока сохраняется.

Если допустить, что имеется только вращение блока, то рассчитываются координаты условного центра $Ц_y$ и угол $\Delta\varphi$. Положение реального центра $Ц_p$, когда поступательное смещение в какой-либо степени все же присутствует, смещено относительно условного на интервал $\ell = U_c / |\Delta\varphi|$, направленный под углом β , определяемым соответствующими равенствами:

$$\beta = \alpha - 90^\circ \quad (\Delta\varphi > 0); \quad \beta = \alpha + 90^\circ \quad (\Delta\varphi < 0).$$

Описанная модель применяется для толкования особенностей и связей наблюдаемого перемещения маркеров, позволяющих объяснить и экстраполировать векторное передвижение точек на всей площади блока. Примеры применения модели показаны на рис. 1.

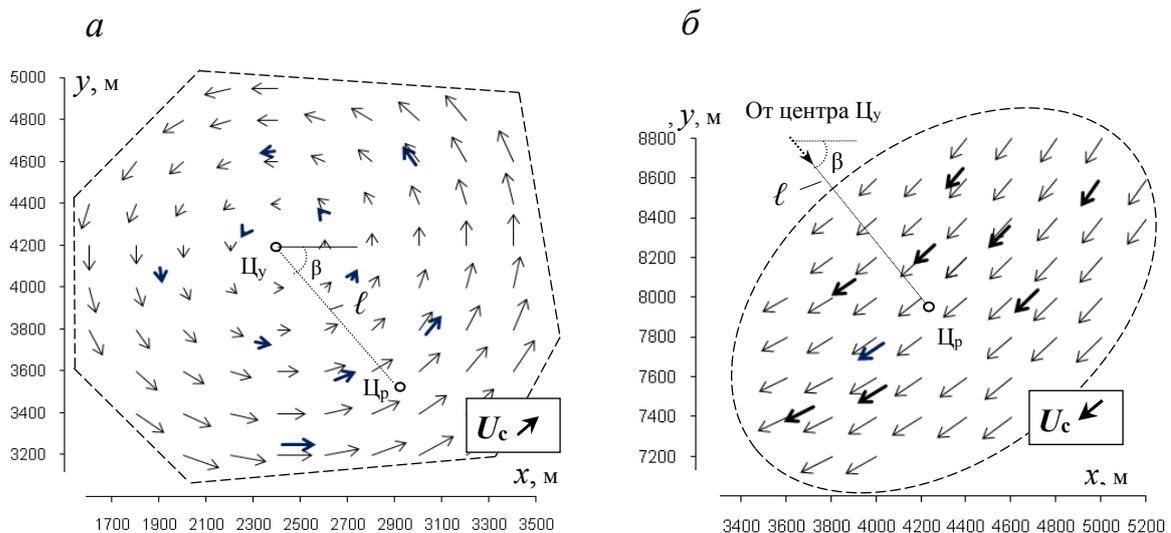


Рис. 1 – Распределение модельных параметров и векторов перемещения точек блока земной поверхности в условиях наиболее выраженного его вращения (а) и поступательного сдвижения (б); $\rightarrow, \longrightarrow$ - векторы перемещения маркеров и точек блока в масштабе, увеличенном в 1000 раз

На фрагменте *a* изображено распределение векторов маркеров и модели в случае преимущественно вращательного перемещения блока земной поверхности. Допуская, что поступательное сдвижение отсутствует ($U_c=0$), определены угол вращения $\Delta\varphi=0,00015$ радиан и координаты его условного центра Ц_y . При обоснованном утверждении о наличии дополнительного поступательного смещения блока на интервал $U_c=130$ мм, направленный под углом $\alpha=37,3^\circ$ ($0,65$ радиан), оценено положение реального центра вращения Ц_p . Он также находится внутри границ блока, но удален от прежнего центра на интервал $\ell=857,5$ м, направленный под углом $\beta=-52,7^\circ$ к оси x .

На фрагменте *b* изображено распределение векторов маркеров и модели в случае преимущественно поступательного перемещения блока земной поверхности. Естественно, что при допущении равенства $U_c=0$ угол вращения блока определился весьма малым $\Delta\varphi=-4\cdot 10^{-5}$ радиан, а положение условного центра вращения Ц_y блока существенно удалено от его границы во внешнюю сторону, что является нереальным. Для достоверной интерпретации перемещений блока данный центр перенесен на интервал $\ell=3590$ м, направленный под углом $\beta=-48^\circ$, до его середины в положение Ц_p . При этом определены соответствующие параметры поступательного смещения $U_c=145$ мм, $\alpha=-138^\circ$ ($-2,41$ радиан).

Бинарная модель перемещения блоков

В модели рассматривается горизонтальное перемещение точек земной поверхности, охватывающее два смежных блока, т. е. две ее контактирующие ячейки в мозаичной структуре горного массива. Свойства каждого блока определяются так же, как в предыдущем разделе. Проекция векторного перемещения точек поверхности с индексами кинематических параметров блоков 1 и 2 представляются в следующем виде:

$$\begin{aligned} U_{x1} &= U_{c1} \cos \alpha_1 - (y - y_{\text{ц1}}) \Delta\varphi_1; & U_{y1} &= U_{c1} \sin \alpha_1 + (x - x_{\text{ц1}}) \Delta\varphi_1; \\ U_{x2} &= U_{c2} \cos \alpha_2 - (y - y_{\text{ц2}}) \Delta\varphi_2; & U_{y2} &= U_{c2} \sin \alpha_2 + (x - x_{\text{ц2}}) \Delta\varphi_2. \end{aligned}$$

Важным дополнением в перемещении блоков является наличие разграничивающей межблочной зоны, в которой горные породы имеют деструктивные нарушения и ослабленные горизонтальные связи. По этой причине проекции векторного перемещения точек условно первого блока U_{x1} , U_{y1} при приближении к данной зоне изменяются и по мере ее пересечения непрерывно переходят в проекции векторного перемещения U_{x2} , U_{y2} точек второго блока. Вклад перемещений первого и второго блоков в бинарную модель регулируется весовыми квазиступенчатыми функциями, изменяющимися в переходной зоне блочного контакта, соответственно, от 1 до 0 и от 0 до 1. Полученные при этом проекции векторов перемещений точек земной поверхности выражаются соответствующими суммами:

$$U_x = \frac{U_{x1}}{1 + e^{\frac{(x-x_r)}{\lambda_x}}} + \frac{U_{x2}}{1 + e^{-\frac{(x-x_r)}{\lambda_x}}}; \quad U_y = \frac{U_{y1}}{1 + e^{\frac{(y-y_r)}{\lambda_y}}} + \frac{U_{y2}}{1 + e^{-\frac{(y-y_r)}{\lambda_y}}},$$

где $y_r = f(x)$ – однозначная гладкая и непрерывная функция, отображающая положение граничной линии половинного уменьшения блочных перемещений, на которой проекции U_{x1} , U_{y1} и U_{x2} , U_{y2} уменьшаются в два раза; $x_r = f^{-1}(y)$ – обратная функция граничной линии; $\lambda_x = \lambda \operatorname{cosec} \gamma$; $\lambda_y = \pm \lambda \sec \gamma$; γ – угол наклона к оси x касательной, проведенной к графику функции y_r ; λ – половина длины релаксации, отложенная по перпендикуляру к граничной половинной линии, при которой перемещения точек блока, противоположно удаленных от нее, отличаются в e раз, где e – основание натурального логарифма.

Схема граничного сопряжения блоков земной поверхности показана на рис. 2. Принимается, что центры вращения первого и второго блоков расположены, соответственно, слева и справа от половинной граничной линии, обозначенной пунктиром. При пересечении граничной зоны и половинной линии от блока 1 к блоку 2 вклад в модель перемещений U_{x1} , U_{y1} уменьшается до нуля и, наоборот, вклад перемещений U_{x2} , U_{y2} от нуля увеличивается. Половина длины релаксации λ характеризует крутизну таких переходов в направлении, перпендикулярном к половинной граничной линии, и, соответственно, ширину (расплывчатость) граничной зоны. Отношение перемещений зональных точек каждого блока, отстоящих перпендикулярно по обе стороны от этой линии на расстояние λ , 2λ и 3λ , изменяется ступенчатой функцией, соответственно, в e , $e^2 = 7,4$ и $e^3 = 20$ раз. При малых углах γ (приблизительно горизонтальном расположении половинной граничной линии) длина λ_x значительно увеличивается и ступенчатость функции в направлении оси x утрачивается. Аналогично, при приблизительно вертикальном расположении половинной граничной линии ступенчатость функции в направлении оси y также утрачивается из-за существенного увеличения длины λ_y . При расположении границы с наклоном $\text{tg } \gamma > 0$ длина λ_y принимается отрицательной.

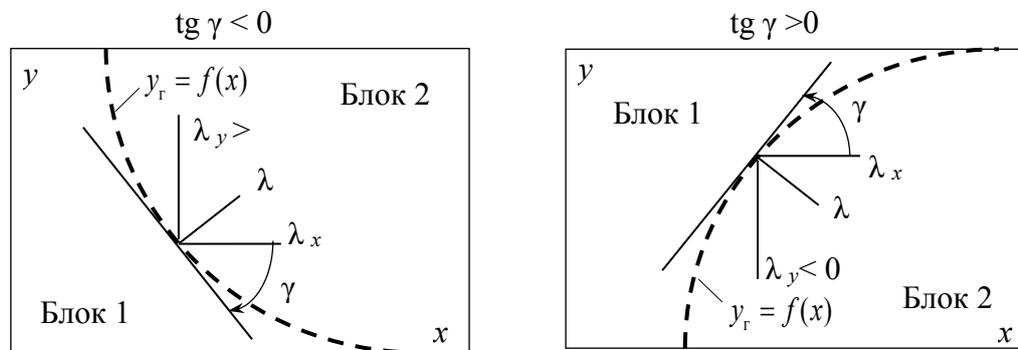


Рис. 2 – Схема граничного сопряжения блоков земной поверхности

Площадное распределение горизонтальных деформаций

Горизонтальные деформации разных направлений рассчитаны по формулам Коши как производные соответствующих проекций векторов перемещения точек, описываемых бинарной моделью. Имеются в виду следующие линейные ϵ_x , ϵ_y и угловые ϵ_{xy} , ϵ_{yx} деформации:

$$\epsilon_x = \frac{dU_x}{dx}; \quad \epsilon_y = \frac{dU_y}{dy}; \quad \epsilon_{xy} = \frac{dU_x}{dy}; \quad \epsilon_{yx} = \frac{dU_y}{dx}.$$

В результате обозначенного дифференцирования получены следующие выражения линейной осевой деформации:

$$\epsilon_x = \frac{U_{x2} - U_{x1}}{\lambda_x \left(2 + e^{\frac{(x-x_r)}{\lambda_x}} + e^{-\frac{(x-x_r)}{\lambda_x}} \right)}; \quad \epsilon_y = \frac{U_{y2} - U_{y1}}{\lambda_y \left(2 + e^{\frac{(y-y_r)}{\lambda_y}} + e^{-\frac{(y-y_r)}{\lambda_y}} \right)}$$

и угловой касательной деформации:

$$\epsilon_{xy} = \frac{\epsilon_x}{|\text{tg } \gamma|} - \frac{\Delta\varphi_1}{1 + e^{\frac{(x-x_r)}{\lambda_x}}} - \frac{\Delta\varphi_2}{1 + e^{-\frac{(x-x_r)}{\lambda_x}}}; \quad \epsilon_{yx} = \epsilon_y |\text{tg } \gamma| + \frac{\Delta\varphi_1}{1 + e^{\frac{(y-y_r)}{\lambda_y}}} + \frac{\Delta\varphi_2}{1 + e^{-\frac{(y-y_r)}{\lambda_y}}}.$$

В расчетах касательных деформаций дифференцирование приведено к одинаковым условиям при смене знака производной $\text{tg } \gamma = df(x)/dx$ от функции половинной граничной линии. Поэтому она взята под знаком модуля.

Площадная деформация земной поверхности двух блоков, объединенных бинарной моделью, определена суммированием линейных и угловых деформаций:

$$\varepsilon = \varepsilon_x + \varepsilon_y + \varepsilon_{xy} + \varepsilon_{yx}.$$

Очевидно, что в удалении от контактной зоны каждый блок перемещается как единое целое под действием жестких поверхностных связей и деформации отсутствуют. Они возникают в зоне контакта, где эти связи нарушаются. Поэтому представляет интерес оценка направления (знака) площадной деформации ε_r на половинной граничной линии, которая расположена в средней части зоны. С учетом связей между деформациями получаем ее выражение

$$\varepsilon_r = \varepsilon_{x_r} \left(1 + \frac{1}{|\operatorname{tg} \gamma|}\right) + \varepsilon_{y_r} \left(1 + |\operatorname{tg} \gamma|\right),$$

где $\varepsilon_{x_r} = \frac{U_{x_{2r}} - U_{x_{1r}}}{4\lambda_x}$; $\varepsilon_{y_r} = \frac{U_{y_2} - U_{y_1}}{4\lambda_y}$; $\Delta U_{x_{2r}} = U_{c_2} \cos \alpha_2 - (y_r - y_{ц2}) \Delta \varphi_2$; $\Delta U_{x_{1r}} = U_{c_1} \cos \alpha_1 - (y_r - y_{ц1}) \Delta \varphi_1$.

Из приведенных соотношений следует, что наличие площадного сжатия или растяжения в каждой точке данной линии характеризуется относительным значением показателя граничной деформации (ПГД):

$$\text{ПГД} = \frac{\Delta U_{x_r}}{\Delta U_y} = \frac{U_{x_{1r}} - U_{x_{2r}}}{U_{y_2} - U_{y_1}}.$$

Данный показатель сравнивается при неравенстве $\operatorname{tg} \gamma > 0$ со значением 1, а при неравенстве $\operatorname{tg} \gamma < 0$ со значением -1. На оценку показателя ПГД влияет, главным образом, знак его знаменателя, выражающего разность вертикального перемещения ΔU_y точек блока, образующуюся при пересечении половинной граничной линии. С учетом этого сформированы критерии, определяющие знак площадной деформации, возникающей вдоль контактной межблочной зоны, которые излагаются в виде следующего правила.

Если значение ПГД при отрицательной разности вертикального перемещения на границе блоков больше, равно или меньше единицы (в условиях $\operatorname{tg} \gamma < 0$), а также минус единицы (в условиях $\operatorname{tg} \gamma < 0$), то в данной точке половинной граничной линии происходит, соответственно, площадное сжатие, компенсация деформаций или растяжение. Если значение ПГД при положительной разности вертикального перемещения на границе больше, равно или меньше единицы (в условиях $\operatorname{tg} \gamma > 0$), а также минус единицы (в условиях $\operatorname{tg} \gamma < 0$), то в данной точке половинной граничной линии происходит, соответственно, площадное растяжение, компенсация деформаций или сжатие.

Критерии знака площадной деформации, возникающей вдоль контактной межблочной зоны, приведены в табл. 1 в виде соответствующих неравенств.

Половинная граничная линия аналитически выражается разными функциями. Например, в случае ее отображения степенной функцией $y_r = Ax^\mu + B$ и обратной функ-

цией $x_r = \left(\frac{y - B}{A}\right)^{1/\mu}$ производная имеет вид $\operatorname{tg} \gamma = A\mu x^{\mu-1}$. При этом релаксационные параметры ступенчатой функции представляются соотношениями

$$\lambda_x = \frac{\lambda \sqrt{1 + (A\mu x_r^{\mu-1})^2}}{|A\mu x_r^{\mu-1}|}; \quad \lambda_y = \lambda \sqrt{1 + (A\mu x^{\mu-1})^2}.$$

Таблица 1

Критерии знака площадной деформации, возникающей вдоль контактной межблочной зоны

Знак $\Delta U_{уг}$ $\Delta U_y \neq 0$	Площадное сжатие $\epsilon_r < 0$	Компенсация деформаций $\epsilon_r = 0$	Площадное растяжение $\epsilon_r > 0$
$tg \gamma < 0$			
$U_{y2} - U_{y1} < 0$	ПГД > -1	ПГД = -1	ПГД < -1
$U_{y2} - U_{y1} > 0$	ПГД < -1		ПГД > -1
$tg \gamma > 0$			
$U_{y2} - U_{y1} < 0$	ПГД > 1	ПГД = 1	ПГД < 1
$U_{y2} - U_{y1} > 0$	ПГД < 1		ПГД > 1

Приведем два примера бинарной модели векторных перемещений точек земной поверхности и сопутствующей деформации горных пород.

На рис. 3а показан план земной поверхности с изолиниями площадной деформации, возникающей под действием векторного преимущественно встречного и перпендикулярного перемещения точек двух блоков горных пород, контактирующих вдоль вогнутой ($tg \gamma > 0$) половинной линии, обозначенной красным пунктиром. Ширина контактной зоны характеризуется половиной длины релаксации $\lambda=30$ м. На всем ее протяжении линейная положительная деформация ϵ_x существенно скомпенсирована отрицательной деформацией ϵ_y . Однако на северо-восточном участке зоны в итоге образуется площадное растяжение, объясняемое преимущественным действием положительной угловой деформации ϵ_{xy} , а на юго-западе происходит небольшое сжатие из-за преимущества отрицательной угловой деформации ϵ_{yx} .

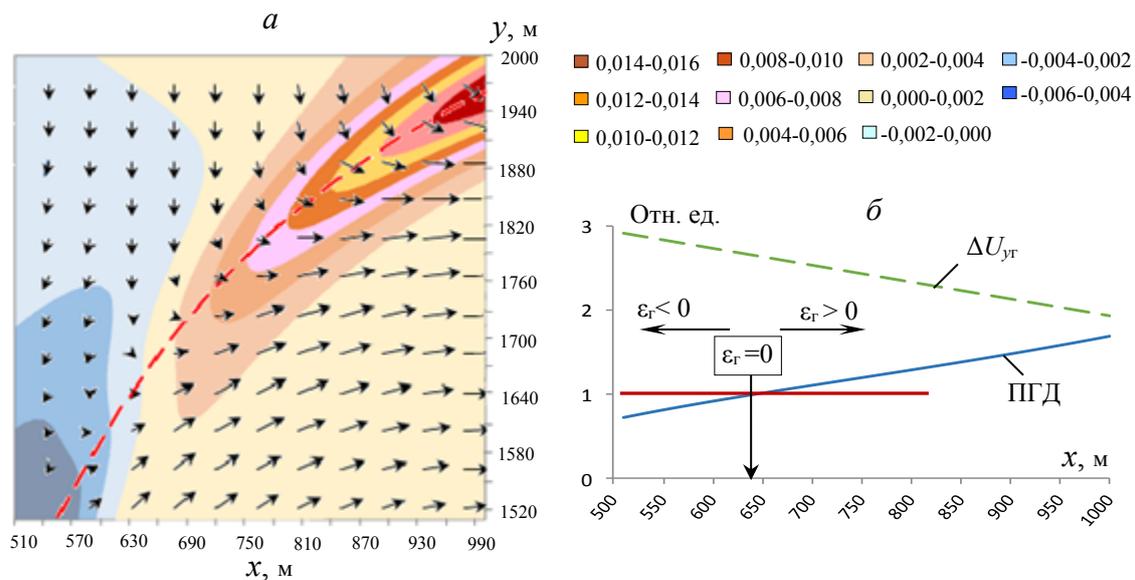


Рис. 3 – План распределения векторного перемещения точек земной поверхности и сопутствующей площадной деформации горных пород в примере 1 (масштаб векторов увеличен в 1000 раз)

Распределение знака деформации вдоль контактной межблочной зоны показано на рис. 3б. Согласно правилу его оценки установлено, что деформация полностью скомпенсирована в точке половинной граничной линии с координатой $x=640$ м, где график ПГД пересекает значение 1. Слева от этой точки происходит сжатие, а справа – растяжение.

На рис. 4а изображен план земной поверхности с изолиниями деформаций, обусловленных сходящимися на северо-западе и расходящимися на юго-востоке векторными перемещениями точек двух блоков горных пород, контактирующих вдоль выпуклой ($\text{tg } \gamma < 0$) половинной линии, обозначенной также красным пунктиром.

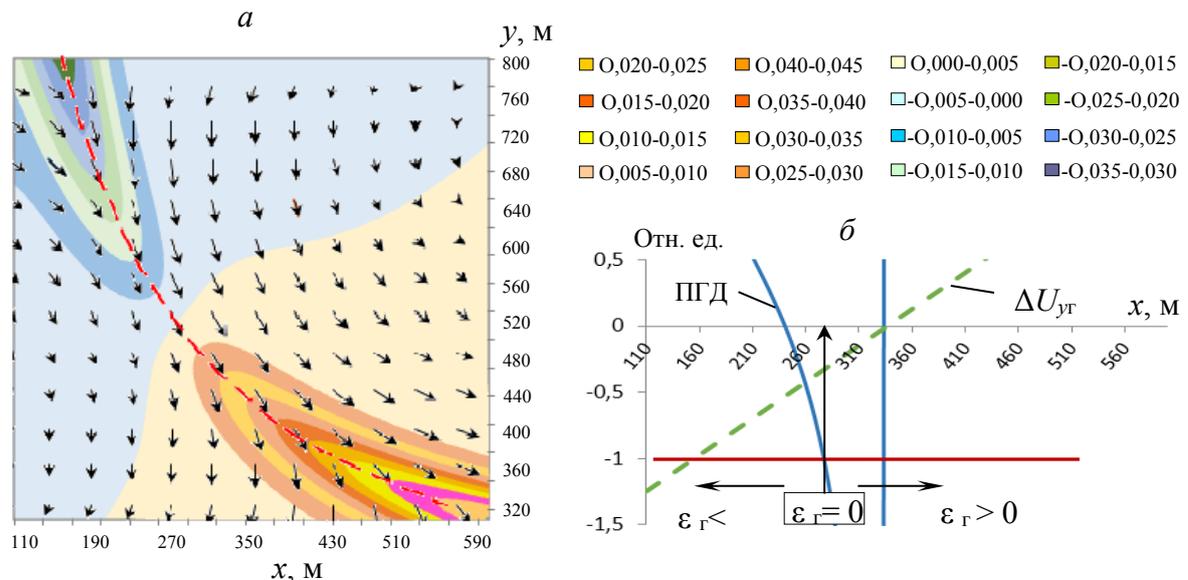


Рис. 4 – План распределения векторного перемещения точек земной поверхности и сопутствующей площадной деформации горных пород в примере 2 (масштаб векторов увеличен в 1000 раз)

Половина длины релаксации λ составляет 20 м. На северо-западном участке контактной зоны образуется площадное сжатие, объясняемое совместной отрицательной линейной и угловой деформацией. На юго-востоке, наоборот, образуется площадное растяжение, объясняемое совместной положительной линейной и угловой деформацией. На рис 4б показано, что, согласно правилу ее знака в контактной зоне, полная компенсация деформации и смена сжатия на растяжение происходит в точке половинной линии с координатой $x=280$ м, где график ПГД пересекает значение -1.

Закключение

Применение приведенных моделей для интерпретации наблюдаемого передвижения маркеров земной поверхности по данным спутниковой навигации GPS дает возможность функционально описать векторное перемещение всех ее точек и определить площадное распределение горизонтальных деформаций, возникающих в краевых межблочных зонах. При этом учитывать в моделях поступательное сдвижение точек земной поверхности необходимо, когда требуется достоверное толкование причин перемещений и деформаций. Изменение или отсутствие сведений о поступательном сдвижении блоков приводит лишь к изменению оптимально рассчитанных координат центров их вращения, но не влияет на углы поворота и распределение векторов перемещения поверхностных точек. Поэтому для описания их перемещений и образующихся блоковых деформаций достаточно по векторам маркеров, объединенных в кластеры по признаку согласованных

направлений, определить положение условных центров вращения. Дополнительно определяются углы вращения блоков, положение срединной линии и ширина межблочной контактной зоны. Если преобладает поступательное смещение блока и такой центр не определяется, то в модели фактор его вращения следует исключить.

Отметим, что при наличии сведений о параметрах упругости горных пород, таких как модуль Юнга и коэффициент Пуассона, возможна оценка площадного распределения горизонтальных напряжений, возникающих в связи с деформациями.

Литература

1. Иванченко Г.Н. Использование данных дистанционного зондирования участков земной коры для анализа геодинамической обстановки / Г.Н. Иванченко, Э.М. Горбунова. - М.: ГЕОС, 2015. - 112 с.
2. Идентификация движений и напряженно-деформированного состояния самоорганизующихся геодинамических систем по комплексным геодезическим и геофизическим наблюдениям / В.А. Середович, В.К. Панкрушин, Ю.И. Кузнецов, Б.Т. Мазуров, В.Ф. Ловягин. - Новосибирск: СГГА, 2004. - 356 с.
3. Мазуров Б.Т. Математическое моделирование при исследовании геодинамики / Б.Т. Мазуров. - Новосибирск: Сибпринт, 2019. - С. 59, 282, 291.
4. Мазуров, Б.Т. Геодинамика и геодезические методы ее изучения. / Б.Т. Мазуров, И.Е. Дорогова.– Новосибирск: СГГА, 2014. - С. 154 - 156.
5. Панжин А.А. Визуализация характеристик деформационных полей по данным геодезических наблюдений / А.А. Панжин, Б.Т. Мазуров, А.А. Силаева // Проблемы недропользования. – 2015. – № 3. – С. 13 – 18. DOI: 10.18454/2313-1586.2015.03.013.
6. Антонов В.А. Функционально-факторная модель горизонтального перемещения локальных блоков земной поверхности / В.А. Антонов // Известия ТулГУ (Науки о Земле). - 2019. - Вып. 4. - С. 187 -195.
7. Антонов В.А. Извлечение математико-статистических закономерностей в экспериментальных исследованиях горно-технологических процессов / В.А. Антонов // Проблемы недропользования. – 2018. – № 4. – С. 61 – 70. DOI: 10.25635/2313-1586.2018.04.061.