

**NEWS**

OF THE NATIONAL ACADEMY OF SCIENCES OF THE REPUBLIC OF KAZAKHSTAN

**PHYSICO-MATHEMATICAL SERIES**

ISSN 1991-346X

<https://doi.org/10.32014/2020.2518-1726.48>

Volume 3, Number 331 (2020), 151 – 159

UDC 51-74, 519.876.5

**N.S. Sydyk, A. Zh. Bibossinov, S.M. Nurakynov**

Institute of Ionosphere JSC "NCSRT", Almaty, Kazakhstan.

E-mail: [nurmahambet.s@gmail.com](mailto:nurmahambet.s@gmail.com); [bibossinov@gmail.com](mailto:bibossinov@gmail.com); [nurakynov@gmail.com](mailto:nurakynov@gmail.com)**MATHEMATICAL MODEL OF THE GEOMECHANICAL  
STATE OF THE UPPER PART OF THE EARTH'S CRUST  
BASED ON SALOME-MECA**

**Abstract.** This article provides a brief description of the Saloma-meca software platform. An approach to the analysis of the geodynamic state of the upper crust of urban areas based on Saloma-meca is described. A generalized block diagram of the work of software and mathematics is built. Geometric models of the earth's crust have been developed for the city of Almaty. Test calculations of the distribution of SSS for the untouched mountain range were carried out according to the averaged data of soil densities based on Saloma-meca for the initial approximation in calculating the stress-strain state of the earth's crust in Almaty.

Keywords: Geodynamics, geomechanics, SSS, Saloma-meca, mathematical model, deformation.

**Introduction.** The stress-strain state (SSS) of the earth's crust is studied mainly in connection with the solution of the problem of assessing the stability of the earth's crust during an earthquake. The parameters of the Earth's crust SSS are one of the main indicators in the construction of a seismic hazard forecast map. To construct maps of the parameters of the SSS, a digital representation of such data as the relief of the day surface and the relief of the sole of the earth's crust, tectonic faults, the field of gravity anomalies, velocities of individual lithosphere blocks, etc. is necessary. The possibility of obtaining this information is related to the achievements of modern space technologies, primarily ground-space monitoring, radar imaging, the development of primary and thematic processing of remote sensing data (RS) and the accumulated experience of theoretical and practical work. Based on these digital data, it is possible to build a reliable geomechanical model of the earth's crust of individual sections.

**Software package.** The object of research is the geomechanical condition of soils near urban structures, as well as the territories of Almaty. Figure 1 shows a generalized block diagram of the operation of software and mathematics. The physical process is the ongoing movement of soil near urban structures. Research, in general terms, is carried out in two interrelated areas - modeling and observation.

By modeling we mean the consideration of the physical model of the process and the construction of its mathematical representation using the equations of mathematical physics. The mathematical model is based on the well-known equations of mechanics of deformable solids to describe the geodynamic state of the earth's crust. The physical and mathematical models used in the software are models of elastic and elastic-plastic environment.

Under the supervision, it is assumed the collection, processing and analysis of GPS data from global and local networks, processing of radar satellite images, data on soil structures, data on building structures, geomechanical parameters, strength and density data.

GAMIT and GLOBK are the software packages for the primary processing of high-precision GPS observations for monitoring the geodynamic state of the lithosphere.

At the initial stage, these experimental data are used to adjust the mathematical model of the physical process and formulate the problem - to determine the initial approximation and boundary conditions.

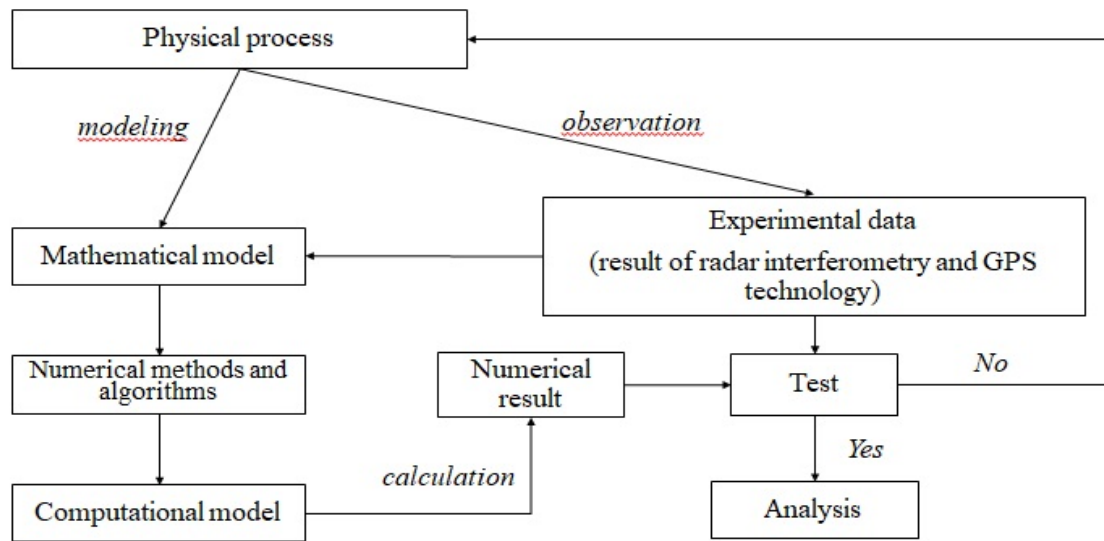


Figure 1 - A generalized block diagram of the operation of software and mathematics

After constructing and adjusting the mathematical model for the basic equations of mathematical physics, a numerical model is built, the initial-boundary-value problem is solved, where the calculation area is the corresponding grid representation of the earth's crust of the studied regions.

At this stage, additional grid modeling programs are used - SALOME - MECA, OpenFOAM, OpenCFD, FLAC3D.

After obtaining the numerical results - the two-dimensional and three-dimensional distribution of the main parameters of the stress-strain state of the upper part of the earth's crust, the data are checked with the original experimental data and analyzed.

SALOME-MECA software platform. SALOME is a general structure for pre and post processing. Code\_aster - for solving (solver) of thermomechanical problems [1]. Salome-Meca is the integration of the code\_aster solver in the Salome platform, including the AsterStudy module for computer-aided design.

Salome-Meca is an open platform that can integrate scientific solutions for modeling various physical fields and implement a wide range of computer simulations. The tasks are to analyze the behavior of the model with sufficient accuracy and performance to help in making decisions on the issues raised. Salome-Meca initially comes with CAD modeling, mesh algorithms, 3D visualization and advanced features for processing simulation data.

*Key features.* Numerical analysis [2] of complex industrial systems requires scientists and engineers to integrate most fields of physics, such as materials science, solid mechanics and structural dynamics, fluid physics and thermohydraulics, nuclear physics and radiation, and electromagnetism. These domains can be combined into a single modeling environment, the Salome-Meca platform. The main features of the Salome-Meca platform are:

- Designing the geometric representation of physical systems (CAD modeling) and the associated discrete model (mesh functions for solvers of finite elements or finite volumes);
- Ability to integrate domain-specific solvers into normalized software components with standard interfaces to facilitate the integration of various physical domains;
- Monitoring of computational workflows defined as graphs of distributed software components, including CAD modeling, solutions for specific areas and data processing components;
- Analysis of modeling data, in particular using visualization of physical fields resulting from computational work processes.

In this context, the key point of the platform is the use of standard data models to describe physical concepts for numerical analysis and to ensure interaction between software components. For example, the MED data model defines a normalized representation for describing geometry cells and fields of physical modeling values. This data model is a key feature of the platform. It comes with a software implementation (MED file library) for saving files and exchanging simulation data between components.

SALOME Mesh and visualization components offer MED format interfaces for importing or exporting data. Domain-specific solvers that interact with SALOME, it is recommended that you use the MED format for input and output files. This configuration leads to a high level of associativity between software components for building modeling workflows.

In addition to processing and visualizing grid and field data, the SALOME platform contains additional modules designed for advanced data analysis:

Data assimilation and optimization environment, for example, for recalibrating model parameters by comparing simulation data with experimental measurements (ADAO module).

Distribution of uncertainties [3] in the modeling workflow, for example, to estimate the uncertainty of the resulting simulation data, taking into account the given uncertainty of the input parameters (OPENTURNS module).

Development of numerical experimental plans, for example, parametric modeling, by examining the indicated area of the space of modeling parameters (PARAMETRIC module).

The theoretical basis. A continuous and homogeneous medium is capable of experiencing deformations of only two types - a change in volume and a change in shape. Volumetric deformations are caused by normal stresses and ultimately lead to separation. Changes in shape caused by shear stresses lead to shear.

The relationship between stresses and strains is most often assumed to be linear, i.e. corresponding to Hooke's law. A power relationship between stress and strain is used in the nonlinear theory of elasticity. These are the main essence and quality of the model of a continuous medium, on the basis of which the mathematical theory of the mechanics of a deformable body is built without taking into account time and temperature factors.

Here are some relationships and dependencies that will be used later to describe the stress-strain state of the rock mass using the continuum mechanics. These relations are studied in detail in courses in the theory of elasticity and plasticity, and are used in rock mechanics, which allows us to confine ourselves to a brief presentation of the basic formulas of the theory of stresses and strains.

A necessary condition for the applicability of these relations in their practical use is the fulfillment of the hypothesis of continuity of the medium, which consists in the continuity of stresses and displacements, as functions of the coordinates of a point [4, 5].

At each point of a continuous medium, a stress-strain state is characterized by a symmetric stress tensor (1.1), a symmetric strain tensor (1.2), and a displacement vector (1.3):

$$\boldsymbol{\sigma} = \begin{bmatrix} \sigma_{xx} & \sigma_{xy} & \sigma_{xz} \\ \sigma_{yx} & \sigma_{yy} & \sigma_{yz} \\ \sigma_{zx} & \sigma_{zy} & \sigma_{zz} \end{bmatrix}; \quad (1.1)$$

$$\boldsymbol{\varepsilon} = \begin{bmatrix} \varepsilon_{xx} & \varepsilon_{xy} & \varepsilon_{xz} \\ \varepsilon_{yx} & \varepsilon_{yy} & \varepsilon_{yz} \\ \varepsilon_{zx} & \varepsilon_{zy} & \varepsilon_{zz} \end{bmatrix}; \quad (1.2)$$

$$\vec{\mathbf{u}} = \begin{bmatrix} \mathbf{u} \\ \mathbf{v} \\ \mathbf{w} \end{bmatrix}; \quad (1.3)$$

For relatively small strains, the strain tensor is expressed in terms of the displacement vector as follows:

$$\varepsilon_{ij} = \frac{1}{2} \left( \frac{\partial u_i}{\partial x_j} + \frac{\partial u_j}{\partial x_i} \right); \quad i = x, y, z; \quad (1.4)$$

called the Cauchy equations.

The movement of an element of a rock mass is determined by the forces applied to it, calculating it we obtain differential equations of motion:

$$\begin{cases} \rho \frac{\partial^2 u}{\partial t^2} = \frac{\partial \sigma_{xx}}{\partial x} + \frac{\partial \sigma_{xy}}{\partial y} + \frac{\partial \sigma_{xz}}{\partial z} + \rho F_x; \\ \rho \frac{\partial^2 v}{\partial t^2} = \frac{\partial \sigma_{yx}}{\partial x} + \frac{\partial \sigma_{yy}}{\partial y} + \frac{\partial \sigma_{yz}}{\partial z} + \rho F_y; \\ \rho \frac{\partial^2 w}{\partial t^2} = \frac{\partial \sigma_{zx}}{\partial x} + \frac{\partial \sigma_{zy}}{\partial y} + \frac{\partial \sigma_{zz}}{\partial z} + \rho F_z; \end{cases} \quad (1.5)$$

where  $\rho$  is the density of the medium;  $F$  - volume forces,  $t$  - time.

The above equations are general relations of the continuum mechanics, regardless of its physical and mechanical properties. These equations are not enough to describe the process of deformation of the medium. Additional relationships are required between stresses, strains, their velocities and a number of other factors, which are called equations of state of the medium. The mechanical equations of state of bodies, including all of the above parameters, are quite complex. Therefore, they are usually limited to the simplest models of the medium, which describe the basic properties and main features of the mechanical processes. Based on them, a further refinement of the deformation process is made.

We give some of the equations of the mechanical states of inelastic media that are most common in the theory of plasticity and rock mechanics. The simplest are the equations of the deformation theory of plasticity, connecting the components of stress and strain,

$$\begin{cases} \varepsilon_x - \frac{1}{3} \Theta^e = \psi(\sigma_{xx} - \sigma); \quad \varepsilon_{yz} = \psi \sigma_{yz}; \\ \varepsilon_y - \frac{1}{3} \Theta^e = \psi(\sigma_{yy} - \sigma); \quad \varepsilon_{xz} = \psi \sigma_{xz}; \\ \varepsilon_z - \frac{1}{3} \Theta^e = \psi(\sigma_{zz} - \sigma); \quad \varepsilon_{xy} = \psi \sigma_{xy}; \end{cases} \quad (1.6)$$

where  $\Theta^e = 3(1-2\nu)\sigma/E$ ;  $\nu$ ,  $E$  — Poisson's ratio and elastic modulus of the medium, respectively;  $\psi$  is a certain function of the invariants of tensors and deviators of stresses and strains,  $\sigma$  is the average (or hydrostatic) pressure at a point.

Note that the volumetric strain in this theory is elastic and is related to the mean pressure  $\sigma$  by Hooke's law.

Due to its simplicity, these equations are widely used to solve engineering problems in the study of rock deformation. For  $\psi = (1-\nu)/E$  they turn into Hooke's law and are essentially its generalization to nonlinear media.

Let us present in general form the basic equations of the theory of elasticity in an invariant form [6], which are used to determine the stress-strain state of rocks.

The equation of motion in invariant form:

$$\rho \frac{\partial^2 \vec{u}}{\partial t^2} = \text{div}(\sigma) + \rho \vec{F}; \quad (1.7)$$

Cauchy equations:

$$\varepsilon = \text{sym}(\nabla \vec{u}) \equiv \frac{1}{2}(\nabla \vec{u} + (\nabla \vec{u})^T); \quad (1.8)$$

The equation of state of elastic media (Hooke's Law), expressed in terms of the Lamé coefficients:

$$\sigma = \lambda \text{trace}(\varepsilon) \mathbf{I} + 2\mu \varepsilon; \quad (1.9)$$

Where

$$\lambda = \frac{E\nu}{(1+\nu)(1-2\nu)}, \mu = \frac{E}{2(1+\nu)}, K = \frac{E}{3(1-2\nu)}; \quad (1.10)$$

E is the elastic modulus (Young);  $\nu$  is the Poisson's ratio; K is the volume expansion module.

The system of equations (1.1) - (1.3) includes 15 equations and 15 unknowns (6 components of the stress tensor, 6 components of the strain tensor, 3 components of the displacement vector), and is a closed system.

The general statement of the problem of determining the stress-strain state of rocks is as follows [7]. Given the boundary conditions (the displacement field or the velocity vector field) and the given initial approximation (SSS from the untouched mountain massif), determine the components of the stress and strain tensors at each point of the study area.

The initial approximation is the SSS of the untouched mountain range, calculated according to the following formulas.

$$\sigma_{zz} = \gamma H, \sigma_{xx} = \sigma_{yy} = k\gamma H; \quad (1.11)$$

where  $\gamma$  is the weight per unit volume of the rock mass, k is the lateral pressure coefficient. Under the assumption of a hydrostatic stress distribution,  $k = 1$ ; with non-hydrostatic distribution -  $0 < k < 1$ ; under the assumption of A.N. Dinnik  $-k = \nu / (1 - \nu)$ .

Methodology for calculating the SSS of the upper horizons of the earth's crust. The general methodology for determining the SSS of the upper horizons of the earth's crust is as follows.

The calculation area is determined (in this case, Almaty with an area of  $36 \times 36 \text{ km}^2$ , to a depth of 5 km.). A geometric model of the studied region is constructed, as shown in figure 2.

As the boundary conditions, GPS data is used, the initial approximation is the SSS of the untouched mountain range.

Further, the system of equations (1.1) - (1.3) is solved by the iterative method. At each iteration step, equation (1.1) is first solved - from this distribution of the components of the strain tensor, the displacements at each point in the volume are calculated. Next, from the Cauchy equations (1.2), we find the values of the strain tensor [8, 9]. From the equation of state (1.3), the new distribution of the stress tensor values is found back. This iteration process is repeated until the difference between the results of the iteration is not small enough.

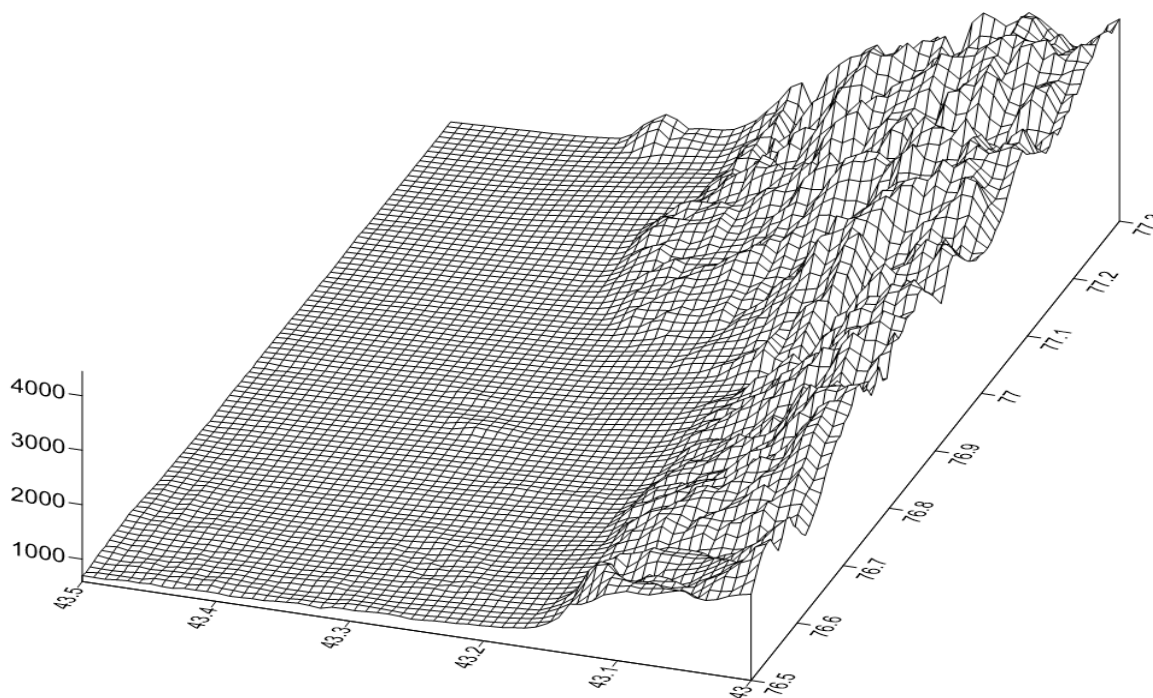


Figure 2 - Curved grid of the calculation area.  
Territory of Almaty  $36 \times 36 \text{ km}^2$

**Results and its discussion.** Geometric models of the earth's crust have been developed for the city of Almaty.

The basic methods for studying the deformation and strength of rocks are analyzed. Expressions are determined for the components of the deformation tensor of the upper horizons of the earth's crust using an inhomogeneous field of displacements of the earth's surface according to GPS observations.

Test calculations of the SSS distribution for the untouched mountain massif, that is, of its own weight (Figure 3), were carried out according to the averaged data of soil densities for the initial approximation when calculating the stress-strain state of the earth's crust in Almaty.

It was also calculated the distribution of stress from its own weight in a slice of land at around 0 meters above sea level (figure 4).

Modeling of the stress-strain state of the earth's crust can be used to develop a monitoring system in the region in order to predict the geodynamic state of the earth's crust and major seismic events. The main difference from traditional approaches is the identification of anomalous zones by the distribution of geodynamic parameters, as a result of geomechanical modeling using a database of geological and geophysical data.

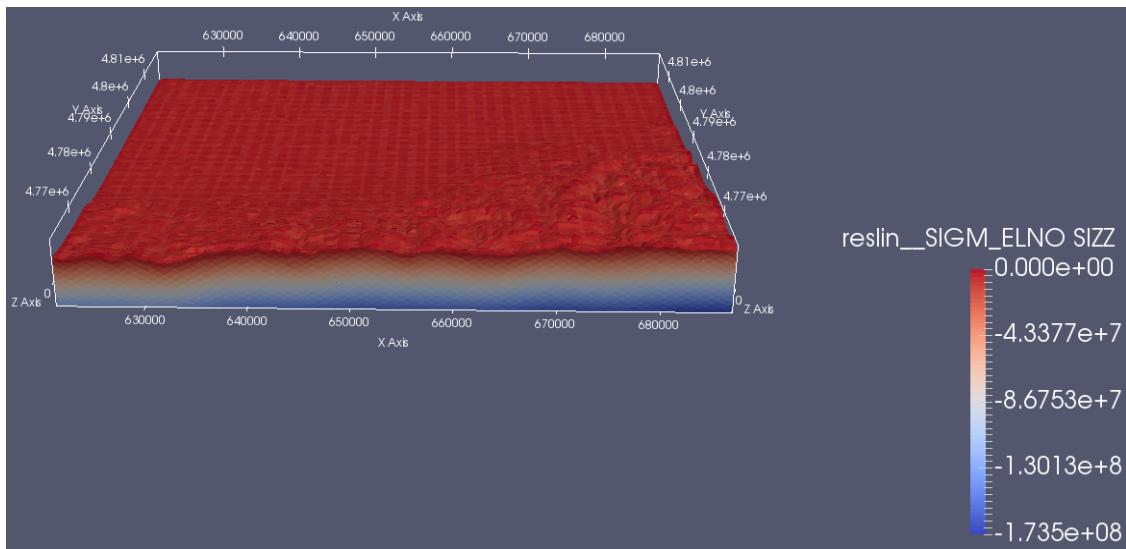


Figure 3 - Setting the first approximation of stress from its own weight

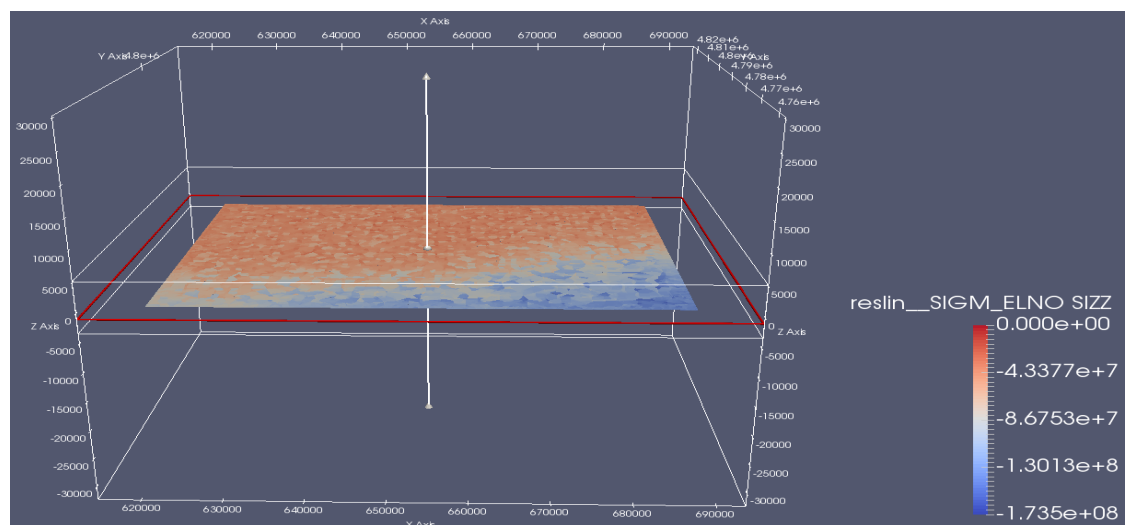


Figure 4 - Stress distribution at a depth of 0 m

**Conclusion.** Mathematical models of the stress-strain state that describe the geodynamic state of the earth's crust over time and the development of science become more accurate and correct, and the Salome-Meca software platform has already contributed. The program is not familiar to a large number of specialists and is only gaining popularity, but even so it is one of the best multifunctional complexes with free access. In general, the development of the system of geodynamic and geophysical monitoring of the earth's crust is necessary both for a deeper study and understanding of the processes occurring in it, and for predicting the further development of these processes in time, and for assessing seismic hazard in the studied region. Estimates of the stress-strain state of the earth's crust based on mathematical models of the geomechanical state using modern seismicity data, complex experimental data of representative GPS monitoring, will advance the problem of practical earthquake prediction.

These works are carried out with financial state support in the framework of the scientific and technical project “Ground-based space monitoring of technogenic processes in urban areas and assessment of the status of large technical facilities”.

**Н.Қ. Сыдық, А.Ж. Бибосынов, С. М. Нұрақынов**

Ионосфера институты, «ҰҒЗТО» АҚ, Алматы, Қазақстан

### **SALOME-МЕСА НЕГІЗІНДЕГІ ЖЕР ҚЫРТЫСЫНЫҢ ЖОҒАРҒЫ БӨЛІГІНІҢ ГЕОМЕХАНИКАЛЫҚ ЖАҒДАЙЫНЫҢ МАТЕМАТИКАЛЫҚ МОДЕЛІ**

**Аннотация.** Жер қыртысының геодинамикалық жай-күйін сипаттайтын кернеулі-деформацияланған күйдің математикалық модельдері уақыт ағымымен және ғылымның дамуымен дәлірек және дұрыс болып келеді және Salome-Meca бағдарламалық платформасыда бұл салаға өз үлесін қосты. Бағдарлама көп мамандарға таныс емес және енді қарқын алып келе жаса да, ең үздік тегін, қолжетімді көпфункционалды кешендердің бірі болып табылады. Salome-Meca түрлі физикалық салаларды модельдеу үшін ғылыми шешімдерді біріктіріп, компьютерлік симуляцияның кең спектрін іске асыра алады. Salome-Meca платформасының негізгі ерекшеліктері мыналар болып табылады: физикалық жүйелердің геометриялық көрінісін жобалау (CAD-модельдеу) және онымен байланысты дискретті модель (соңғы элементтердің немесе соңғы көлемдердің торларының функциялары); түрлі физикалық домендерді біріктіруді жеңілдету үшін стандартты интерфейсмен нормаланған бағдарламалық компоненттерге доменге тән торларды біріктіру мүмкіндігі; CAD-модельдеуді, нақты облыстар үшін шешімдерді және деректерді өңдеу компоненттерін қоса алғанда, бөлінген бағдарламалық компоненттердің графиктері ретінде анықталған есептеулердің жұмыс процестерін қадағалау; есептеу жұмыс процестерінің нәтижесінде туындайтын физикалық өрістерді визуализациялау арқылы модельдеу деректерін талдау.

Бұл мақалада Salome-meca негізінде қала құрылыстарына жақын жерлердің, сондай-ақ Алматы қаласы аумағының жер қыртысының жоғарғы бөлігінің геодинамикалық жай-күйін талдау әдісі сипатталған. Жалпы алғанда, талдау өзара байланысты екі бағытта жүзеге асырылады – модельдеу және бақылау.

Тұтас және біртекті орта тек екі түрдің деформациясын сынауға қабілетті – көлемнің өзгеруі және пішіннің өзгеруі. Көлемді деформациялар қалыпты кернеудің әсерінен туындайды және ақырында үзуге әкеледі. Жанама кернеулерден туындайтын пішіннің өзгеруі кесікке әкеледі.

Кернеулер мен деформациялар арасындағы байланыс көбінесе сызықты, яғни Гука Заңына сәйкес қабылданады. Кернеу мен деформация арасындағы дәрежелік тәуелділік серпімділіктің сызықсыз теориясында қолданылады. Уақыт пен температура факторларын ескермей Деформацияланатын дене механикасының математикалық теориясы құрылатын тұтас орта моделінің негізгі мәні мен сапасы осындай.

Тұтас ортаның әрбір нүктесіндегі кернеулі-деформацияланған жай-күй кернеудің симметриялы тензорымен, деформацияның симметриялы тензорымен және орын ауыстыру векторымен сипатталады.

Салыстырмалы түрде кіші деформациялар кезінде деформация тензоры Коши теңдеулері деп аталатын орын ауыстыру векторы арқылы көрінеді. Тау жыныстары массивінің қозғалысы дифференциалды қозғалыс теңдеулерін есептей отырып, оған қоса берілген күштермен анықталады. Жоғарыда келтірілген теңдеулер оның физика-механикалық қасиеттеріне қарамастан тұтас орта механикасының жалпы арақатынасы болып табылады. Бұл теңдеулер ортаны деформациялау процесін сипаттау үшін жеткіліксіз. Кернеулер, деформациялар, олардың жылдамдықтары және орта жағдайының теңдеулері деп аталатын басқа да бірқатар факторлар арасындағы қосымша қатынастар қажет.

Кернеу теңдеулері, деформация және орнын ауыстыру жүйелері 15 теңдеуді және 15 белгісізді (6 кернеу тензоры компоненті, 6 деформация тензоры компоненті, 3 орын ауыстыру векторының компоненті) қамтиды және тұйық жүйе болып табылады. Тау жыныстарының кернеулі-деформацияланған күйін анықтау

максатының жалпы қойылымы былайша көрінеді. Берілген шекаралық жағдайлар кезінде (жылжу өрісі немесе жылдамдық векторының өрісі) және осы бастапқы жақындау кезінде зерттелетін аумақтың әрбір нүктесіндегі кернеу мен деформация тензорларының компоненттерін анықтау. Бастапқы жақындағанда, нөлдік емес тау-кен массивінің ҚДК алынады.

Жер қыртысының жоғарғы көкжиектері учаскелерінің ҚДК анықтаудың жалпы әдістемесі келесідей: есептеу аймағы анықталады (бұл жағдайда Алматы қаласы ауданы  $36 \times 36$  км<sup>2</sup>, 5 км тереңдікке дейін). Зерттелетін аймақтың геометриялық моделі құрылады. Шекаралық шарттар ретінде GPS деректері пайдаланылады, бастапқы жақындау арқылы қозғалмайтын тау массивінің ҚДК алынады.

Бұдан әрі итерациялық әдіспен кернеу, деформация және орнын ауыстыру тендеулерінің жүйесі шешіледі. Итерацияның әрбір қадамында бірінші болып кернеу тендеуі шешіледі-бұл бөлуден деформация тензорының компоненті көлемнің әрбір нүктесінде орын ауыстырулар есептеледі. Бұдан әрі – Коши тендеулерінен деформация тензорының мәні болады. Күй тендеуінен - кері кернеу тензоры мәндерінің жаңа бөлінуі анықталады. Бұл итерация процесі итерация нәтижелері арасындағы айырмашылық аз болғанша қайталанатын.

Алматы қ.жер қабатының кернеулі-деформацияланған жағдайын есептеу кезінде бастапқы жақындау үшін Salome-меса негізінде топырақ тығыздығының орташаланған деректері бойынша күш түсірілмеген тау-кен алқабы үшін кернеулі-деформацияланған жағдайды бөлудің тестілік есептері жүргізілді. Сондай-ақ, теңіз деңгейінен 0 метр белгідегі жер кесіндісінде өз салмағынан кернеуді бөлу есептелді.

Жер қыртысының кернеулі-деформацияланған жай-күйін модельдеу жер қыртысының геодинамикалық жай-күйін және ірі сейсмикалық оқиғаларды болжау мақсатында өңірдегі мониторинг жүйесін дамыту үшін пайдаланылуы мүмкін. Дәстүрлі тәсілдерден негізгі ерекшелігі геологиялық-геофизикалық деректер базасын пайдалана отырып геомеханикалық үлгілеу нәтижесі ретінде геодинамикалық параметрлерді бөлу бойынша аномальды аймақтарды анықтау болып табылады.

**Түйін сөздер:** Геодинамика, геомеханика, ҚДК, Salome-меса, математикалық модель, деформация.

**Н.К. Сыдық, А.Ж. Бибосынов, С. М. Нурақынов**

Институт ионосферы АО «НЦКИТ», Алматы, Казахстан

#### **МАТЕМАТИЧЕСКАЯ МОДЕЛЬ ГЕОМЕХАНИЧЕСКОГО СОСТОЯНИЯ ВЕРХНЕЙ ЧАСТИ ЗЕМНОЙ КОРЫ НА ОСНОВЕ SALOME-МЕСА**

**Аннотация.** Математические модели напряжённо-деформированного состояния, описывающие геодинамическое состояние земной коры, с течением времени и развитием науки становятся более точными и корректными и программная платформа Salome-Меса уже внесла свой вклад. Программа не знакома большому количеству специалистов и только набирает популярность, но даже при этом является одним из лучших многофункциональных комплексов с бесплатным доступом. Salome-Меса может интегрировать научные решения для моделирования различных физических областей и реализовывать широкий спектр компьютерных симуляций. Основными особенностями платформы Salome-Меса являются: проектирование геометрического представления физических систем (CAD-моделирование) и связанной с ним дискретной модели (функции сетки для решателей конечных элементов или конечных объемов); возможность интегрировать специфичные для домена решатели в нормализованные программные компоненты со стандартными интерфейсами, чтобы облегчить объединение различных физических доменов; наблюдение за рабочими процессами вычислений, определенными как графики распределенных программных компонентов, включая CAD-моделирование, решения для конкретных областей и компоненты обработки данных; анализ данных моделирования, в частности с использованием визуализации физических полей, возникающих в результате вычислительных рабочих процессов.

В данной статье описан подход к анализу геодинамического состояния верхней части земной коры вблизи городских сооружений, а также территорий г.Алматы на основе Salome-меса. Анализ, в общих чертах, осуществляется в двух взаимосвязанных направлениях – моделирование и наблюдение.

Сплошная и однородная среда способна испытывать деформации только двух видов – изменение объема и изменение формы. Объемные деформации вызываются действием нормальных напряжений и приводят, в конечном счете, к отрыву. Изменения формы, вызываемые касательными напряжениями, приводят к срезу.

Связь между напряжениями и деформациями чаще всего принимается линейной, т.е. соответствующей закону Гука. Степенная зависимость между напряжениями и деформацией используется в нелинейной теории упругости. Таковы основная суть и качество модели сплошной среды, на базе которой строится математическая теория механики деформируемого тела без учета факторов времени и температуры.

Напряженно-деформированное состояние в каждой точке сплошной среды характеризуется симметричным тензором напряжений, симметричным тензором деформации и вектором перемещения.



При относительно малых деформациях тензор деформации выражается через вектор перемещений называемые уравнениями Коши. Движение элемента массива горных пород определяется приложенными к нему силами, подсчитав которые получим дифференциальные уравнения движения. Приведенные выше уравнения являются общими соотношениями механики сплошной среды независимо от ее физико-механических свойств. Этих уравнений недостаточно для описания процесса деформирования среды. Необходимы дополнительные соотношения между напряжениями, деформациями, их скоростями и рядом других факторов, которые называют уравнениями состояния среды.

Системы уравнений напряжений, деформации и перемещении включают в себя 15 уравнений и 15 неизвестных (6 компонент тензора напряжений, 6 компонент тензора деформации, 3 компоненты вектора перемещений), и являются замкнутой системой. Общая постановка задачи определения напряженно-деформированного состояния горных пород выглядит следующим образом. При заданных граничных условиях (поле перемещений или поле вектора скорости) и данном начальном приближении определить компоненты тензоров напряжений и деформации в каждой точке исследуемой территории. Начальным приближением принимается НДС нетронутого горного массива.

Общая методика определения НДС участков верхних горизонтов земной коры выглядит следующим образом: определяется область вычисления (в данном случае г. Алматы с площадью 36x36 км<sup>2</sup>, до глубин 5 км). Строится геометрическая модель исследуемого региона. В качестве граничных условий используются данные GPS, начальным приближением берется НДС нетронутого горного массива.

Далее итерационным методом решается система уравнений напряжений, деформации и перемещении. В каждом шаге итерации первым решается уравнение напряжений – от данного распределения компонент тензора деформации просчитываются перемещения в каждой точке объема. Далее – из уравнений Коши находятся значения тензора деформации. От уравнения состояния – обратно находится новое распределение значений тензора напряжений. Этот процесс итерации повторяется до состояния, когда разница между результатами итерации не будет достаточно малой.

Были проведены тестовые расчеты распределения НДС для не тронутого горного массива, по осредненным данным плотностей грунтов на основе Saloma-меса для начального приближения при расчете напряженно-деформированного состояния земной коры г. Алматы. Также было просчитано распределение напряжения от собственного веса в срезе земли на отметке 0 метров над уровнем моря.

Моделирование напряженно-деформированного состояния земной коры могут быть использованы для развития системы мониторинга в регионе в целях прогноза геодинамического состояния земной коры и крупных сейсмических событий. Основным отличием от традиционных подходов является выявление аномальных зон по распределению геодинамических параметров как результат геомеханического моделирования с использованием базы геолого-геофизических данных.

**Ключевые слова:** Геодинамика, геомеханика, НДС, Saloma-меса, математическая модель, деформация.

#### Information about authors:

Sydyk N.K. Institute of Ionosphere, JSC NCSRT, Almaty, Kazakhstan, head of the Cartography and GIS sector, PhD doctor student; [nurmahambet.s@gmail.com](mailto:nurmahambet.s@gmail.com); <https://orcid.org/0000-0003-1429-2393>;

Bibossinov A.Zh., Institute of Ionosphere, JSC NCSR, Almaty, Kazakhstan, Deputy chairman of the board, PhD; [bibossinov@gmail.com](mailto:bibossinov@gmail.com); <http://orcid.org/0000-0002-5219-4279>;

Nurakynov S.M., Institute of Ionosphere, JSC NCSRT, Almaty, Kazakhstan, head of the Cartography and GIS Laboratory; [nurakynov@gmail.com](mailto:nurakynov@gmail.com); <https://orcid.org/0000-0001-9735-7820>

#### REFERENCES

- [1] [Electronic resource]. URL: <https://code-aster.org/spip.php?rubrique2>
- [2] [Electronic resource]. URL: <https://code-aster.org/UPLOAD/DOC/Formations/01-overview-2.pdf>
- [3] [Electronic resource]. URL: <https://code-aster.org/UPLOAD/DOC/Formations/02-salome.pdf>
- [4] Nikolaevsky V.N. The defining equations of plastic deformation of granular media / Applied Mathematics and Mechanics, 1971. N.35. №6. P. 1070-1082 (in Russian).
- [5] Biot M.A. Mechanics of incremental deformations. N.Y., 1965. 497 p.
- [6] J.N. Reddy. An Introduction to continuum mechanics. Cambridge University Press, 2003. 354p.
- [7] Research Conference on shear strength of Cohesive soils. U.S.A., University of Colorado, Boulder: American society of Civil Engineers, 1960. – 1164p.
- [8] Bishop A.U. Shear strength parameters of undisturbed and crushed soil samples // In: Mechanics. New in foreign science, vol. 2. "Determining the laws of soil mechanics" / edited by V.N.Nikolaevsky. M.: Publishing House "Mir", 1975. P. 7-75 (in Russian).
- [9] FLAC and Numerical Modeling in Geomechanics. Proceedings of the international symposium / Edited by Christine Detournay & Roger Hart. Balkema, 1999. 512 p.