

Моделирование деформационных процессов земной поверхности на нефтегазовом месторождении

А. К. Кенесбаева^{1✉}, О. С. Курманбаев², Р. С. Курманбаев²,
Л. Л. Жалилов¹

¹Казахский национальный исследовательский технический университет
имени К. И. Сатпаева (Satbayev University), г. Алматы, Республика Казахстан

²Казахский национальный университет имени аль-Фараби,
г. Алматы, Республика Казахстан

✉ a.kenesbayeva@satbayev.university

Резюме. Рассмотрен вопрос моделирования деформационных процессов земной поверхности на территории нефтегазового месторождения методом конечных элементов. В качестве примера выбрано месторождение углеводородов Северные Бузачи, расположенное в Мангистауской области. На основе данных геодинамических наблюдений, выполненных на месторождении, произведены расчеты компонентов относительных деформаций и построена пространственная модель деформационного поля методом конечных элементов. Полученная модель отражает геодинамическую ситуацию на всей территории рассматриваемого месторождения, позволяет выявить участки наиболее интенсивных смещений и определить особенности пространственного распределения деформационных процессов. Данный подход позволяет объективно оценить влияние разработки нефтегазового месторождения на напряженно-деформированное состояние геологической среды и способствует повышению безопасности эксплуатации месторождения.

Ключевые слова: деформации земной поверхности, нефтегазовые месторождения, метод конечных элементов, тензор деформации, геодинамический мониторинг, горизонтальные смещения

Для цитирования: Кенесбаева А.К., Курманбаев О.С., Курманбаев Р.С., Жалилов Л.Л. Моделирование деформационных процессов земной поверхности на нефтегазовом месторождении. *Маркшейдерия и недропользование*. 2026; 26 (4): 38-43. <https://doi.org/10.56195/20793332-2026-26-4-38-43>.

Modeling of deformation processes of the earth's surface at an oil and gas field

A. K. Kenesbayeva^{1✉}, O. S. Kurmanbayev², R. S. Kurmanbayev², L. L. Zhalilov¹

¹Kazakh National Research Technical University K. I. Satpayev
(Satbayev University), Almaty, Republic of Kazakhstan

²Al-Farabi Kazakh National University, Almaty, Republic of Kazakhstan

✉ a.kenesbayeva@satbayev.university

Abstract. This article examines the modeling of earth's surface deformation processes within an oil and gas field using the finite element method. The Severnye Buzachi hydrocarbon field, located in the Mangystau region, is used as a case study. Based on geodynamic observations conducted at the field, relative deformation components are calculated and a spatial model of the deformation field is constructed using the finite element method. The resulting model reflects the geodynamic situation throughout the entire field, identifies areas of the most intense displacements, and determines the spatial distribution of deformation processes. This approach enables an objective assessment of the impact of oil and gas field development on the stress-strain state of the geological environment and contributes to improved field safety.

Keywords: earth surface deformations, oil and gas fields, finite element method, deformation tensor, geodynamic monitoring, horizontal displacement

For citation: Kenesbayeva A.K., Kurmanbayev O.S., Kurmanbayev R.S., Zhalilov L.L. Modeling of deformation processes of the earth's surface at an oil and gas field. *Mine Surveying and Subsurface Use*. 2026; 26 (4): 38-43. (In Russ.). <https://doi.org/10.56195/20793332-2026-26-4-38-43>.

Введение

Иntenсивная разработка нефтегазовых месторождений сопровождается изменением пластового давления, перераспределением масс и напряжений в недрах, что может приводить к деформациям земной поверхности. Своевременное выявление и прогнозирование таких процессов является важной задачей обеспечения промышленной и экологической безопасности. Для решения данной задачи необходим комплексный мониторинг, объединяющий геодезические и геофизические методы наблюдений, а также строгие математические методы анализа и интерпретации данных. Геодинамический мониторинг подразумевает: наличие сети геодезических пунктов, выполнение ГНСС наблюдений и геометрического нивелирования, а также гравиметрические измерения и сейсмический мониторинг [1, 2]. Интеграция результатов комплексных наблюдений с учетом геологических и эксплуатационных характеристик месторождения позволяет предупредить опасные геодинамические риски.

Геодезический мониторинг на нефтегазовых месторождениях позволяет определить величины горизонтальных и вертикальных смещений на ограниченном числе маркерных точек. Для выявления пространственного распределения деформационных процессов по всей исследуемой территории возникает необходимость применения методов математического моделирования [3–5]. Одним из наиболее эффективных и широко используемых методов моделирования является метод конечных элементов (МКЭ), с помощью которого выполняется интерполирование результатов геодезических наблюдений на всю область исследования [6]. В результате применения МКЭ определяются компоненты тензора деформации в любой точке расчетной области, выявляются зоны концентрации деформаций и характер их пространственного распределения, что показывает единую картину деформационного состояния исследуемой территории.

Материал и методы исследования

Месторождение Северные Бузачи находится в северо-западной части полуострова Бузачи, в непосредственной близости от разрабатываемых месторождений Каражанбас и Каламкас (рис. 1). В административном плане относится к территории Тюбкараганского района Мангистауской области [7, 8].

Месторождение было открыто в 1975 году, а промышленная разработка ведется с начала 1990-х годов. За более чем 30 лет эксплуатации здесь осуществляется интенсивная добыча нефти, сопровождающаяся изменением пластового давления и развитием геодинамических процессов.

Рельеф территории преимущественно равнинный с абсолютными отметками от -20 до +30 м, что благоприятствует проведению геодезического мониторинга. В геологическом отношении месторождение приурочено к Южно-Мангышлакскому нефтегазоносному бассейну и сложено мощной толщей мезозойских и кайнозойских осадочных пород. Основными продуктивными горизонтами являются юрские и нижнемеловые песчаники, перекрытые глинистыми водоупорными породами.

Подтверждением геодинамической активности региона являются сейсмические события. В 2010–2011 годах в районе города Актау было зарегистрировано более 40 удаленных землетрясений, а в феврале 2011 года на территории месторождения Тенгиз произошло землетрясение магнитудой 4,1

[9]. Кроме того, в апреле 2000 года в результате интенсивного проседания земной поверхности были затоплены значительные участки месторождений Каламкас и Каражанбас, расположенных в непосредственной близости от месторождения Северные Бузачи. Эти факты свидетельствуют о продолжающихся геодинамических процессах в западной части Казахстана и подчеркивают необходимость их комплексного геодезического мониторинга.

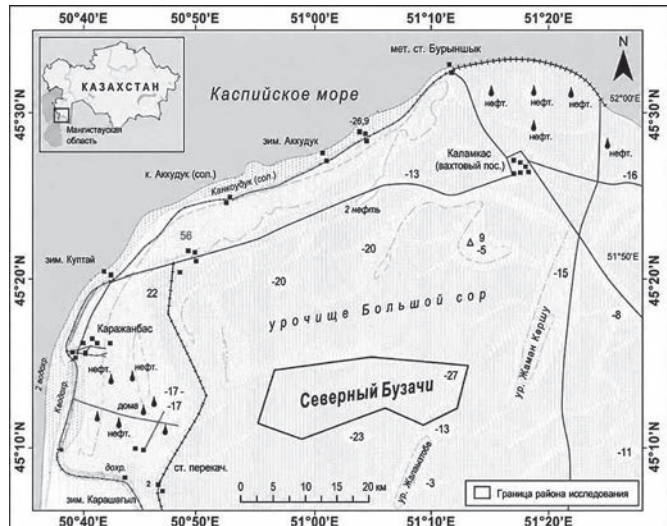


Рис. 1. Расположение месторождения Северные Бузачи /
Fig. 1. Location of the Northern Buzachi deposit

Комплексные наблюдения за сдвижением земной поверхности, выполнены НПЦ «ГЕОКЕН» в период с 2007 по 2010 год [10]. Анализ результатов мониторинга подтверждает наличие горизонтальных и вертикальных движений дневной поверхности на рассматриваемой территории и их изменения во времени. Исходные данные (табл.) для расчета относительных деформаций в горизонтальной плоскости были сформированы по данным ГНСС-наблюдений [11]. Координаты пунктов приведены в условной системе для первых 15 пунктов.

Таблица / Table

Координаты узловых точек и смещения по горизонтальным осям /
Coordinates of nodal points and displacements along horizontal axes

№	X, м	Y, м	U _x , мм	U _y , мм
1	544584,1	5001289,0	-0,9	18,5
2	546451,6	5001390,7	-1,1	17,0
3	547479,0	5001386,9	-1,0	14,2
4	548007,8	5001409,5	-1,1	13,7
5	548597,3	5001445,6	-1,3	14,7
6	549173,2	5001560,9	-1,5	14,3
7	549208,5	5000940,3	-0,5	12,9
8	550186,7	5000940,3	-0,4	10,5
9	550384,3	5001239,6	-0,9	11,2
10	551202,6	5000973,2	-0,6	11,4
11	551545,2	5001177,3	-0,6	11,1
12	552068,3	5001488,8	-1,3	8,7
13	553054,4	5001577,8	-1,4	7,6
14	553709,9	5001347,3	-1,3	8,1
15	554509,9	5001102,7	-1,1	7,9

Для количественной характеристики горизонтальных деформаций земной поверхности в основном используют компоненты относительных деформаций, включающие линейные деформации по координатным направлениям, а также деформацию сдвига. На основе полученных значений формируется тензор деформации, который служит для описания напряженно-деформированного состояния исследуемой области и позволяет оценивать величину и направление деформационных изменений [12, 13].

$$\begin{cases} \varepsilon_{xx} = \frac{\partial u_x}{\partial x} \\ \varepsilon_{yy} = \frac{\partial u_y}{\partial y} \\ \varepsilon_{xy} = \frac{1}{2} \left(\frac{\partial u_x}{\partial y} + \frac{\partial u_y}{\partial x} \right) \\ T_\varepsilon = \begin{pmatrix} \varepsilon_{xx} & \varepsilon_{xy} \\ \varepsilon_{yx} & \varepsilon_{yy} \end{pmatrix} \end{cases} \quad (1)$$

где, ε_{xx} – деформация в направлении оси X;
 ε_{yy} – деформация в направлении оси Y;
 ε_{xy} – деформация сдвига;
 T_ε – тензор деформации.

Согласно МНК, исследуемая область разбивается на систему треугольных конечных элементов, вершинами которых являются пункты геодезической сети с известными координатами и горизонтальными смещениями. В пределах каждого элемента предполагается линейное изменение компонент перемещений, что позволяет вычислить производные перемещений и определить компоненты тензора деформации.

Перемещения внутри конечного элемента аппроксимируются функциями формы:

$$U_x(x, y) = \sum_{i=1}^3 N_i U_{xi}, \quad U_y(x, y) = \sum_{i=1}^3 N_i U_{yi}, \quad (2)$$

где, N_i – функция формы треугольного конечного элемента;
 U_{xi} и U_{yi} – функция формы треугольного конечного элемента.

Компоненты тензора деформации определяются через производные функций перемещений:

$$\varepsilon = Bd, \quad (3)$$

где B – матрица производных функций формы, определяющая связь между перемещениями и деформациями;
 d – вектор узловых перемещений.

В результате расчета значения деформаций определяют для каждого конечного элемента, после чего формируется непрерывное поле деформаций, позволяющее анализировать пространственное распределение зон растяжения, сжатия и сдвиговых деформаций на исследуемой территории [14, 15].

Результаты и обсуждение

На первом этапе была сформирована расчетная геометрическая модель исследуемого участка. За основу приняты координаты контура территории нефтегазового месторождения Северные Бузачи, по которым построена граница расчетной области. В пределах данного контура была создана система расчетных узлов, равномерно распределенных по площади участка с учетом его геометрической формы. Координаты узлов были сформированы в программной среде MATLAB. Расположение узлов выбиралось таким образом, чтобы обеспечить равномерное покрытие исследуемой

территории и корректное построение триангуляционной сети Делоне. Использование триангуляции Делоне позволило сформировать устойчивую расчетную сетку без пересечения элементов, обеспечивающую корректную интерполяцию поля деформаций. Сформированная расчетная сеть узлов и построенная триангуляционная сеть представлены на рисунке 2.

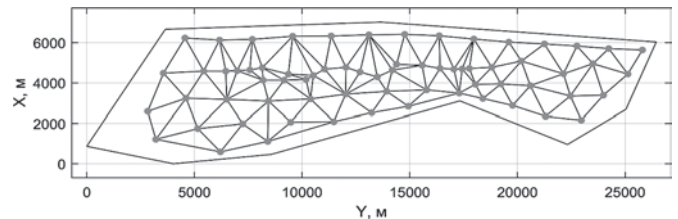


Рис. 2. Триангуляция по узловым точкам /
 Fig. 2. Triangulation by nodal points

Построенная триангуляционная сеть использовалась для интерполяции поля горизонтальных смещений и последующего вычисления компонент тензора деформации (рисунок 3). Интерполяция выполнялась в пределах построенной триангуляционной сети Делоне, что обеспечило непрерывное распределение компонентов горизонтальных смещений на всей площади исследуемого участка.

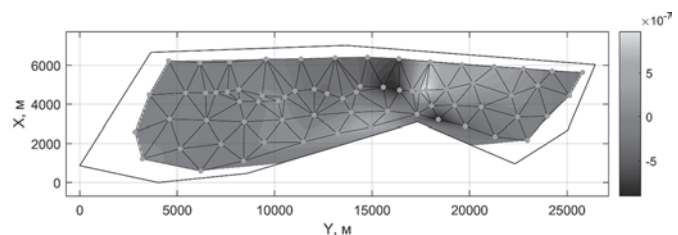


Рис. 3. Поле деформации ε_{xx} /
 Fig. 3. Deformation field ε_{xx}

На основе распределения компоненты горизонтальных смещений U_y была рассчитана компонента тензора деформации ε_{yy} , характеризующая относительные деформации вдоль оси Y. Результаты расчета пространственного распределения компоненты ε_{yy} представлены на рисунке 4. Положительные значения ε_{yy} соответствуют относительному растяжению вдоль оси Y, отрицательные – относительному сжатию.

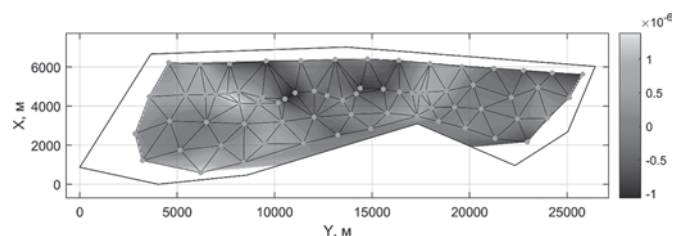


Рис. 4. Поле деформации ε_{yy} /
 Fig. 4. Deformation field ε_{yy}

Аналогичным образом по распределению компоненты U_x была рассчитана компонента тензора деформации ε_{xx} , характеризующая деформации вдоль оси X. Полученное распределение компоненты ε_{xx} приведено на рисунке 5. Аналогично компоненте ε_{yy} положительные значения ε_{xx} характеризуют растяжение вдоль оси X, а отрицательные – сжатие.

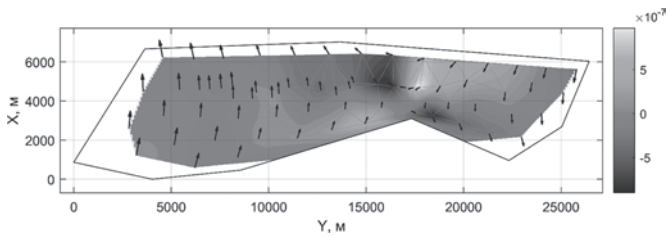


Рис. 5. Поле деформации ε_{xx} с векторной диаграммой /
Fig. 5. Deformation field ε_{xx} with vector diagram

Для анализа пространственной структуры деформационного поля поверх изолиний компоненты ε_{yy} (была построена векторная диаграмма. Направление стрелок соответствует направлению горизонтальных смещений, а их длина пропорциональна величине перемещения в соответствующей расчетной точке. Совместное отображение поля деформаций и векторов горизонтальных смещений приведено на рисунке 6.

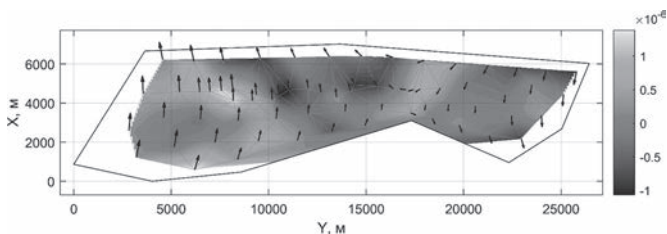


Рис. 6. Поле деформации ε_{yy} с векторной диаграммой /
Fig. 6. Deformation field ε_{yy} with vector diagram

Анализ пространственного распределения показывает, что на исследуемой территории наблюдаются участки как растяжения, так и сжатия. Направления векторов горизонтальных смещений согласуются с распределением компонент тензора деформации, что подтверждает корректность выполненного моделирования.

По результатам моделирования компонента ε_{xx} изменяется в диапазоне от $-9,09 \cdot 10^{-7}$ до $+1,06 \cdot 10^{-6}$, а компонента ε_{yy} – от $-1,07 \cdot 10^{-6}$ до $+1,51 \cdot 10^{-6}$. Следует отметить, что ком-

поненты ε_{xx} и ε_{yy} имеют различные диапазоны изменения и пространственное распределение, что свидетельствует о неоднородном характере деформационного поля исследуемого участка.

Коэффициент корреляции r между величинами ε_{xx} и ε_{yy} составил 0,311, что соответствует слабой положительной взаимосвязи. Это свидетельствует о том, что компоненты деформации не дублируют друг друга и характеризуют деформации земной поверхности в различных направлениях координатных осей.

Выводы

1. В результате выполненного исследования разработана модель пространственного распределения деформационных процессов земной поверхности на территории нефтегазового месторождения Северные Бузачи с применением метода конечных элементов. На основе данных геодинимических наблюдений выполнен расчет компонентов относительных деформаций, что позволило получить непрерывное поле деформаций на всей исследуемой территории. Анализ результатов моделирования показал наличие участков как растяжения, так и сжатия земной поверхности, что свидетельствует о неоднородном характере деформационного состояния исследуемого участка.

2. Полученный коэффициент корреляции между компонентами деформации характеризует слабую положительную взаимосвязь между ними. Это подтверждает, что данные компоненты описывают различные направления деформационного поля и не являются взаимозаменяемыми характеристиками. Сопоставление направления векторов горизонтальных смещений с распределением компонентов тензора деформации подтвердило корректность выполненного моделирования.

3. Рассмотренный подход позволяет выявлять зоны концентрации деформаций и оценивать особенности пространственного распределения деформационного поля, что имеет практическое значение для мониторинга геодинимического состояния нефтегазовых месторождений и повышения безопасности их эксплуатации.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ / REFERENCES

1. Ашихмин С.Г. Особенности методик прогнозирования напряженно-деформированного состояния пород при разработке месторождений углеводородов. *Минеральные ресурсы России. Экономика и управление*. 2008; 2: 38-41.
Ashikhmin S.G. Features of methods for predicting the stress-strain state of rocks in the development of hydrocarbon deposits. *Mineral Survey and Subsoil Use*. 2008; 2: 38-41. (In Russ.).
2. Нурпеисова М.Б., Орынбасарова Э.О., Кыргызбаева Г.М. и др. Методы изучения геодинимических процессов: Учебник для вузов. Алматы: КазННТУ им. К.И. Сатпаева. 2022: 209.
Nurpeissova M.B., Orynbasarova E.O., Kyrgyzbayeva G.M., et al. Methods for studying geodynamic processes. *Textbook for universities*. Almaty: KazNITU named after K.I. Satpayev. 2022: 209. (In Russ.).
3. Волков О.В., Васильев Ю.В., Иноземцев Д.П. и др. Результаты мониторинга деформационных процессов методами высокоточной геодезии и радарной интерферометрии на геодинимическом полигоне Заполярного нефтегазоконденсатного месторождения. *Маркшейдерия и недропользование*. 2024; 3: 97-103. https://doi.org/10.56195/20793332_2024_3_97_103.
Volkov O.V., Vasiliev Yu.V., Inozemtsev D.P., et al. Results of monitoring deformation processes by high-precision geodesy and radar interferometry methods at the geodynamic test site of the Zapolyarnoye oil and gas condensate field. *Mine Surveying and Subsurface Use*. 2024; 3: 97-103. https://doi.org/10.56195/20793332_2024_3_97_103. (In Russ.).
4. Кенесбаева А., Турсбеков С.В., Кузнецова И.А. Мониторинг смещений земной поверхности при разработке месторождений углеводородов. *Маркшейдерия и недропользование*. 2019; 2 (100): 42-44.
Kenesbaeva A., Tursbekov S.V., Kuznetsova I.A. Monitoring of earth's surface displacements during hydrocarbon deposit development. *Mine Surveying and Subsurface Use*. 2019; 2 (100): 42-44. (In Russ.).
5. Писарев В.С. Геотехнический мониторинг при эксплуатации нефтегазоносных месторождений. *Маркшейдерия и недропользование*. 2024; 4 (132): 67-71. https://doi.org/10.56195/20793332_2024_4_67_71.
Pisarev V.S. Geotechnical monitoring during exploitation of oil and gas fields. *Mine Surveying and Subsurface Use*. 2024; 4 (132): 67-71. (In Russ.). https://doi.org/10.56195/20793332_2024_4_67_71.

6. Мазуров Б. Т., Дорогова И. Е. Геодинамика и геодезические методы ее изучения: учебное пособие. Новосибирск, 2014: 175.
Mazurov B.T., Dorogova I.E. Geodynamics and geodetic methods of its study: textbook. manual. Novosibirsk, 2014: 175. (In Russ.).
7. Жардаев М.К. Совершенствование методики проведения мониторинга деформаций земной поверхности при освоении нефтегазовых месторождений: дис. ... канд. техн. наук. Алматы, 2006: 170. Рег. 0406РК00941n.
Zhardaev M.K. Improving the methodology for monitoring land surface deformation during the development of oil and gas fields: Dissertation for co-authorship with a candidate of engineering degrees. Almaty, 2006: 170. Reg. No. 0406РК00941n.
8. Дорогова И. Е., Духовников К. С. Разработка геодинамического программного модуля для оценивания деформаций земной коры по результатам геодезических измерений. *Вестник СГУГиТ*. 2022; 27 (6): 15-27. (In Russ.).
Dorogova I.E., Dukhovnikov K.S. Development of a geodynamic software module for estimating crustal deformations based on the results of geodetic measurements. *Bulletin of SGUGiT*. 2022; 27 (6): 15-27. (In Russ.).
9. Кенесбаева А. Моделирование геодинамических процессов на территории нефтегазового месторождения Северные Бузачи: дис. ... д-ра фил. наук (PhD). Алматы, 2023: 88.
Kenesbayeva A. Modeling of geodynamic processes in the territory of the Northern Buzachi oil and gas field: dissertation for undergraduate degree of doctor of science (PhD). Almaty, 2023: 88. (In Russ.).
10. Бакиева А.Б. Уточнение геологического строения среднеюрских отложений месторождения Северные Бузачи с целью оптимизации освоения трудноизвлекаемых запасов углеводородного сырья: дис. ... канд. геол.-минералог. наук. Москва, 2014: 96.
Bakieva A.B. Clarification of the geological structure of the Middle Jurassic deposits of the Northern Buzachi field. Dissertation for undergraduate degree of candidate of geology and mineralogy. Moscow, 2014: 96. (In Russ.).
11. Мурзагалиев, Д.М. Сейсмо-геодинамические условия разработки нефтегазовых месторождений на шельфе Северного Каспия. *Геология, география и глобальная энергия*. 2011; 4 (43): 32-38.
Murzagaliyev, D.M. Seismic and geodynamic conditions for the development of oil and gas fields on the shelf of the Northern Caspian. *Geology, Geography and Global Energy*. 2011; 4 (43): 32-38. (In Russ.).
12. Сапарбекова М.А., Умирова Г.К., Ахметов Е.М. Геодинамический мониторинг недр на месторождении Северные Бузачи. *Труды Международных Сатпаевских чтений*. 2015; III: 49-54.
Saparbekova M.A., Umirova G.K., Akhmetov E.M. Geodynamic monitoring of subsoil at the Northern Buzachi field. *Proceedings of the Int. Satpayev Readings*. 2015; III: 49-54. (In Russ.).
13. Соляной П.Н. Оптимизация систем разработки залежей нефти с неоднородным коллектором сложного строения: дис. ... д-ра фил. наук. Уфа, 2018: 150.
Solyanoy P.N. Optimization of systems for developing oil deposits with a heterogeneous reservoir of complex structure: dissertation for co-authorship with a candidate of engineering degrees. Ufa, 2018: 150. (In Russ.).
14. Фадеев А.Б. Метод конечных элементов в геомеханике. Москва, 1987: 221.
Fadееv A.B. Finite element method in geomechanics. Moscow, 1987: 221. (In Russ.).
15. Zienkiewicz O.C., Taylor R.L., Zhu J.Z. The Finite Element Method: Its Basis and Fundamentals. 7th ed. Oxford: Elsevier, 2013.

СВЕДЕНИЯ ОБ АВТОРАХ

Айгуль Кенесбаевна Кенесбаева –

PhD, ассоциированный профессор кафедры маркшейдерского дела и геодезии, Казахский национальный исследовательский технический университет имени К. И. Сатпаева (Satbayev University), г. Алматы, Республика Казахстан;
<https://orcid.org/0000-0002-0869-5762>;
e-mail: a.kenesbayeva@satbayev.university

Олжас Сейтботанович Курманбаев –

PhD, доцент, Казахский национальный университет имени аль-Фараби, г. Алматы, Республика Казахстан;
<https://orcid.org/0000-0002-4867-6910>;
e-mail: olzhas_ak@list.ru

Руслан Сейтботанович Курманбаев –

докторант, Казахский национальный университет имени аль-Фараби, г. Алматы, Республика Казахстан;
<https://orcid.org/0009-0008-8060-036X>;
e-mail: a7754684124@gmail.com

Лутпулла Летинович Жалилов –

магистрант, Казахский национальный исследовательский технический университет имени К. И. Сатпаева (Satbayev University), г. Алматы, Республика Казахстан;
<https://orcid.org/0009-0007-2700-9514>;
e-mail: geostock@mail.ru

ABOUT THE AUTHORS

Aigul K. Kenesbayeva –

PhD, associated professor, Department of "Mining survey and Geodesy", Kazakh National Research Technical University K. I. Satpayev (Satbayev University), Almaty, Republic of Kazakhstan;
<https://orcid.org/0000-0002-0869-5762>;
e-mail: a.kenesbayeva@satbayev.university

Olzhas S. Kurmanbayev –

PhD, Associate Professor, Al-Farabi Kazakh National University, Almaty, Republic of Kazakhstan;
<https://orcid.org/0000-0002-4867-6910>;
e-mail: olzhas_ak@list.ru

Ruslan S. Kurmanbayev –

PhD student, Al-Farabi Kazakh National University, Almaty, Republic of Kazakhstan;
<https://orcid.org/0009-0008-8060-036X>;
e-mail: a7754684124@gmail.com

Lutpulla L. Zhalilov –

master's student, Kazakh National Research Technical University K. I. Satpayev (Satbayev University), Almaty, Republic of Kazakhstan;
<https://orcid.org/0009-0007-2700-9514>;
e-mail: geostock@mail.ru

Критерии авторства:

Авторы заявляют о равном вкладе каждого в работу над статьей.

Конфликт интересов:

Авторы заявляют об отсутствии конфликта интересов.

Информация о статье

Поступила в редакцию: 27.07.2026

Поступила после рецензирования: 07.08.2026

Принята к публикации: 13.08.2026

Contribution:

The authors declare the equal contribution of everyone to the work on the article.

Conflict of interest:

The authors declare no conflict of interest.

Article info

Received: 27.07.2026

Revised: 07.08.2026

Accepted: 13.08.2026