

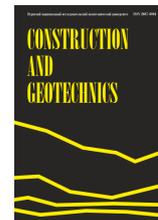


**пермский
политех**

CONSTRUCTION AND GEOTECHNICS

Т. 16, № 2, 2025

<http://vestnik.pstu.ru/arhit/about/inf/>



DOI: 10.15593/2224-9826/2025.2.05

УДК 624.131.3

СОЗДАНИЕ ПРОСТРАНСТВЕННЫХ ИНЖЕНЕРНО-ГЕОЛОГИЧЕСКИХ ЭЛЕМЕНТОВ ДЛЯ ЧИСЛЕННЫХ ГЕОТЕХНИЧЕСКИХ РАСЧЕТОВ

Р.В. Мельников, И.С. Сальный, М.А. Степанов

Тюменский индустриальный университет, Тюмень, Российская Федерация

О СТАТЬЕ

Получена: 07 июля 2024
Одобрена: 22 декабря 2024
Принята к публикации:
2 июня 2025

Ключевые слова:

геология, геостатистика, модель грунта, детерминированная модель, kriging, вариограмма, метод конечных элементов.

АННОТАЦИЯ

Геологические условия, обладающие большой неопределенностью, всегда проходят стадию схематизации. Она может быть реализована различными способами. Например, в виде стохастического подхода, когда параметры грунта являются случайными величинами с указанием закона распределения. Такой подход для описания грунтовой среды для строительства не используется. Основным является детерминированный подход со статистическим выделением инженерно-геологических элементов и указанием их границ. В этом методе границы разделения зачастую проводятся условно и выражаются в виде инженерно-геологических разрезов. Традиционно соединение инженерно-геологических элементов между геовыработками выполняется линиями или кривыми. На основании геологических разрезов сложно создать пространственную геологическую модель для численных расчетов, так как внешние границы могут быть существенно удалены от области инженерно-геологического изучения. Для построения пространственной инженерно-геологической модели предлагается использовать геостатистический метод Kriging, создающий поверхность разделения различных инженерно-геологических элементов в пространстве. В этом случае создаваемая поверхность разделения инженерно-геологических элементов будет зависеть как от статистически обрабатываемых параметров, так и от их положения. Преимуществом Kriging является возможность экстраполировать полученные результаты на границы расчетной области моделирования. В статье по исходным данным были подобраны девять различных теоретических вариограмм и оценивалось, как зависит выбор вариограммы на результаты численного расчета малозаглубленного плитного фундамента. Расчетная модель грунтовой среды состояла из равных малых гексаэдрических элементов, которым присваивалась соответствующая модель грунта в зависимости от их положения относительно границы разделения. Результаты численных расчетов демонстрируют, что значительного влияния на осадки фундамента от различного разделения грунтового основания не происходит. Во многом это объясняется распределительной способностью плитного фундамента и наличием большой активной зоны грунта под его подошвой.

© Мельников Роман Викторович – кандидат технических наук, доцент, e-mail: melnikovrv@tyuiu.ru.

Сальный Иван Сергеевич – кандидат технических наук, e-mail: salnyjis@tyuiu.ru.

Степанов Максим Андреевич – кандидат технических наук, доцент, e-mail: stepanovma@tyuiu.ru.

Roman V. Melnikov – Ph. D. in Technical Sciences, Associate Professor, e-mail: melnikovrv@tyuiu.ru.

Ivan S. Salny – Ph. D. in Technical Sciences, e-mail: salnyjis@tyuiu.ru.

Maksim A. Stepanov – Ph. D. in Technical Sciences, Associate Professor, e-mail: stepanovma@tyuiu.ru.



Эта статья доступна в соответствии с условиями лицензии Creative Commons Attribution-NonCommercial 4.0 International License (CC BY-NC 4.0)

This work is licensed under a Creative Commons Attribution-NonCommercial 4.0 International License (CC BY-NC 4.0)

CREATION OF VOLUMETRIC SOIL ELEMENTS FOR NUMERICAL GEOTECHNICAL ANALYSIS

R.V. Melnikov, I.S. Salny, M.A. Stepanov

Industrial University of Tyumen, Tyumen, Russian Federation

ARTICLE INFO

Received: 07 July 2024
Approved: 22 December 2024
Accepted for publication:
02 June 2025

Keywords:

geology, geostatistics, soil model,
deterministic model, kriging,
variogram, FEM.

ABSTRACT

Geological conditions with great uncertainty always go through a schematization stage. It can be realized in different ways. For example, in the form of stochastic approach, when ground parameters are random variables with the indication of the distribution law. Such an approach is not used to describe the ground environment for construction. The main approach is deterministic approach with statistical separation of IGE and indication of their boundaries. In this method, the boundaries of separation are often conducted conditionally and expressed in the form of engineering-geological sections. Traditionally, the connection of IGEs between geologic excavations is made by lines or curves. Based on geologic sections, it is difficult to create a spatial geologic model for numerical calculations because the outer boundaries may be significantly distant from the geotechnical engineering study area. To build a spatial engineering geologic model, it is proposed to use the geostatistical method of Kriging, which creates a surface of separation of different IGEs in space. In this case, the created surface of IGE separation will depend on both statistically processed parameters and their position. The advantage of Kriging is the possibility to extrapolate the obtained results to the boundaries of the computational domain of modeling. In the paper, nine different theoretical variograms were selected from the initial data and the results of numerical calculation of a shallow-deposited slab were evaluated.

Введение

При построении инженерно-геологической модели всегда происходит этап схематизации, т.е. процесс упрощения реального природного объекта [1]. Такое упрощение возможно и корректно, если модель будет достаточно точно описывать реальность [2, 3]. Основой этого принципа является выделение инженерно-геологических элементов (ИГЭ) – некоторой грунтовой единицы, служащей для создания инженерно-геологической модели. Согласно СП 446.1325800.2019, инженерно-геологическим элементом является некоторый объем грунтов одного типа (подтипа), вида (подвида) и разновидности, при этом изменения характеристик таких грунтов ограничены предельными значениями коэффициентов вариации.

Для природного объекта, обладающего бесконечной степенью сложности и неопределенности, использование подхода с выделением ИГЭ позволяет существенно упростить инженерно-геологическую модель. Такой подход носит название «детерминированный», т.е., используя подобную схематизацию, мы точно знаем, где в грунтовом основании расположен тот или иной ИГЭ и какими характеристиками он обладает, неопределенности больше нет [4]. При этом важным уточнением является то, что такой подход объективно снимает неопределенность грунтового основания только там, где непосредственно проводилось изучение, – в точках геovyработок [5, 6]. Между ними всегда будет присутствовать неопределенность, так как невозможно достаточно точно знать положение границы разделения ИГЭ и их свойства [7], особенно если расстояние между геovyработками назначаются в соответствии с СП 47.13330.2016 и СП 446.1325800.2019. Для снижения неопределенности распространения ИГЭ возможно использовать геофизические методы исследования либо методы математического обоснования границ разделения ИГЭ [8–10].

Неустранимое наличие неопределенности распространения ИГЭ и их свойств между геovyработками явилось толчком к появлению и развитию различных моделей, снижающих ее [11–14]. При этом многие модели отказывались и от детерминированного постула-

та. Так появились стохастические модели: интерполяционная, вероятностная, модель изменчивости и мн. др. [15, 16]. Данное направление в инженерной геологии считается перспективным и активно развивается [17–19].

При этом следует учитывать, что инженерно-геологическая модель грунтов должна являться исходными данными для проектирования. Поэтому задачей инженера-геолога должна быть не только схематизация природных грунтовых условий, но и возможность последующего применения такой схематизации проектировщиком. Дело в том, что в настоящее время при проектировании большинства объектов строительства создаются расчетные модели в различных программах, реализующих метод конечных элементов для совместного расчета здания с грунтовым основанием (как обладающих конструктивными расчетами – «Лира», SCAD, Stark, ESTAB и т.д., так и геотехническими – Midas, Plaxis, ZSoil, SiO и т.д.). В этих программах реализован детерминированный подход к схематизации грунтовых условий, основанный на принципе выделения различных слоев грунта – ИГЭ. То есть подход к схематизации инженерно-геологических элементов, применяемый в инженерных изысканиях, реализован в численных расчетах.

Для использования стохастических методов построения инженерно-геологических моделей их необходимо нормативно закрепить и подробно описать. Необходимо, чтобы это стало постоянной практикой для инженеров-геологов. В численных расчетных комплексах это должно стать альтернативным вариантом создания грунтовых условий, вероятно, только для зданий и сооружений 3-й геотехнической категории. В настоящее время такой подход реализован только в отдельных расчетных комплексах [3, 20].

Методы исследования

Используемый в большинстве программных комплексов детерминированный метод представления инженерно-геологических условий в качестве исходных данных требует указания для геовыработок координат и напластования ИГЭ. Далее необходимо разделить массив грунта на ИГЭ как в пределах границ изучения (провести интерполяцию результатов между отдельными геовыработками), так и за пределами таких границ (провести экстраполяцию результатов за пределами границы изучения). Это необходимо для совместных численных расчетов, чтобы устранить влияние граничного эффекта (рис. 1).

Границы разделения ИГЭ между геовыработками проводятся на основе принятого метода их разделения. Самым простым и часто используемым методом является линейной (line), когда любые границы разделения ИГЭ (для слоев, клиньев, линз) являются линиями (рис. 2, а). Также часто используется метод «сплайн» (spline), создающий кривую, плавно соединяющую выбранные точки (рис. 2, б). В нормативных документах СП 446.1325800.2019 и СП 47.13330.2016 не указывается, какой метод для границ разделения ИГЭ использовать, поэтому при построении инженерно-геологического разреза либо решение принимает инженер-геолог, либо модель разбиения уже встроена в программные средства (например, GeoSolution, Инж-Гео, GeoSimple и др.). Следует учитывать, что выбор метода создания границ разделения ИГЭ оказывает влияние как на область между геовыработками – область интерполяции, так и, что существенно, на область за пределами геовыработок – область экстраполяции (рис. 2).

Итак, при изучении грунтовых условий строится детерминированная инженерно-геологическая модель. При этом границы разделения ИГЭ между геовыработками строятся либо линиями, либо используя функцию «сплайн». В результате данная модель передается проектировщику (в виде отчета по инженерно-геологическим изысканиям), обычно как набор мно-

жества плоских инженерно-геологических разрезов. Если при проектировании объектов строительства необходимо создать пространственную расчетную модель, то проектировщик вынужден на основании инженерно-геологических разрезов создать пространственные инженерно-геологические условия не только под объектом строительства, но и за его пределами. Большинство расчетных комплексов не позволяют выбирать метод разбиения границ ИГЭ в грунтовом массиве, при этом часто используется линейная модель разбиения.

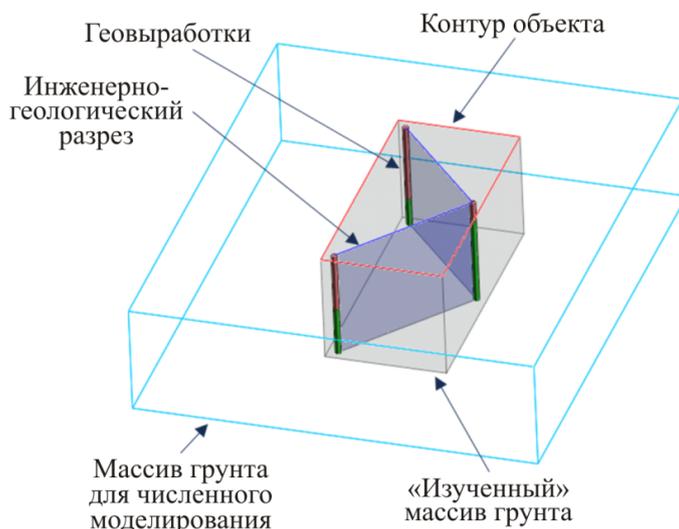


Рис. 1. Схематическое изображение основных элементов для численного решения геотехнической задачи

Fig. 1. Schematic representation of the main elements for the numerical solution of a geotechnical problem

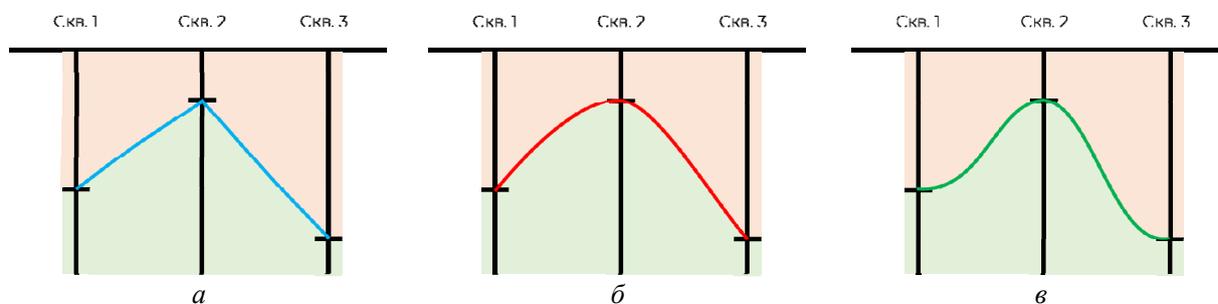


Рис. 2. Разделение ИГЭ в зависимости от принятого метода:
а – метод Line; б – метод Spline; в – метод Kriging

Fig. 2. Separation of soil layers depending on the adopted method:
а – Line method; б – Spline method; в – Kriging method

При выполнении расчетов в специализированных геотехнических программных комплексах вопрос о пространственном разделении ИГЭ должен быть так же важен [20, 21], как и вопрос о назначении параметров моделей грунта, их определении и калибровке. В настоящее время этому еще не уделяется достаточного внимания, особенно в нормах проектирования. Таким образом, при геотехнических расчетах просматривается явный дисбаланс в достоверности построения расчетной модели грунтового основания: параметры ИГЭ проходят проверку на достоверность путем их калибровки для принятой численной модели грунта, а пространственные границы разделения таких ИГЭ создаются либо автоматически, либо с участи-

ем проектировщика, но практически не имеют обоснования их достоверности или даже оценки. Если при создании пространственных грунтовых условий возникает необходимость в корректировке созданных объемных грунтовых массивов, то приходится вводить дополнительные фиктивные геовыработки, исходные данные для которых назначаются нестрого.

Использование линейного метода и метода «сплайн» для разделения ИГЭ является самым простым, но не учитывающим ни случайность распределения данных, ни геологические особенности. Именно поэтому наука «геостатистика» более подробно занимается такими вопросами [11, 12]. Одним из методов, описывающих границы разделения элементов грунта, является kriging [22–25]. Особенностью данного метода является использование вариограммы, т.е. функции, описывающей переход от исходных данных к границе неопределенности данных. Использование метода kriging является популярным средством формирования контуров различных элементов грунтового массива (особенно в нефтегазовой геологии). Отдельные программы для геотехнических расчетов используют метод kriging для разделения ИГЭ [26], например ZSoil [27], в других же программах используются методы Line или Spline (Plaxis, Midas).

Таким образом, цель работы – исследовать влияние выбора параметров метода Kriging (вид теоретической вариограммы и ее значений) для создания пространственных границ разделения ИГЭ на результаты численного геотехнического расчета.

Для численных геотехнических моделей выделение ИГЭ в пространстве происходит путем разделения исходного грунтового объема (солида) поверхностями, ограничивающими выделяемый ИГЭ по кровле и по подошве. Исходными данными таких поверхностей служат пространственные координаты границ ИГЭ для геовыработок, полученные из отчета по изысканиям. Важным является то, что поверхность не должна аппроксимировать исходные данные, так как выделение самих ИГЭ и их границ является результатом работы инженера-геолога, в основном по анализу данных бурового журнала и графиков статического зондирования.

Исходными данными для тестовой задачи (см. рис. 1) являются три геовыработки с различными глубинами разделения инженерно-геологических элементов, что соответствует второй категории сложности инженерно-геологических изысканий. Вначале необходимо построить экспериментальную вариограмму. Общее число расстояний между геовыработками составляет количество сочетаний из всех геовыработок n по двум: $C_3^2 = 3$. Если принять кратность расстояния 1,0 м, то два меньших расстояния между геовыработками объединяются для общего определения вариации (рис. 3). Затем необходимо подобрать вид теоретической вариограммы и параметры: range («радиус»), still («порог») и nugget.

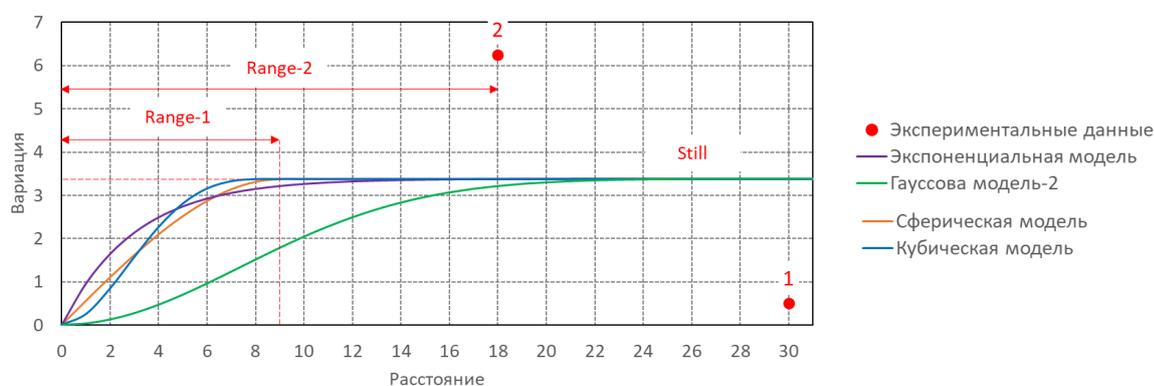


Рис. 3. Теоретические вариограммы в методе kriging для описания экспериментальных данных

Fig. 3. Theoretical variograms in the kriging method for describing experimental data

Обычно инженерно-геологические изыскания для площадных объектов содержат большое количество геовыработок, подчиняясь минимальным требованиям СП 47.13330.2016. Это создает критически малый объем данных для экспериментальной вариограммы [28]. Данных для вариограммы на расстоянии до 15 м обычно нет. Это не позволяет подобрать подходящую теоретическую вариограмму на всем диапазоне экспериментальных данных, а только оценить значение «порога» и, возможно, «радиуса». Поэтому на основании исходных данных были подобраны параметры для описания различных теоретических вариограмм (табл. 1), часть из которых представлена ниже (см. рис. 3). При подборе теоретических вариограмм была намеренно создана неподходящая – «Логарифмическая № 2», создаваемое на ее основе разделение ИГЭ частично не основывалось на исходных данных. В большинстве случаев значение range («радиус») принималось равным половине минимального расстояния между геовыработками – 9,01 м, значение still («порог») – медианному значению вариации 3,38 м. Для последовательного создания каждой поверхности использовался геостатистический программный комплекс Surfer.

Таблица 1

Теоретические вариограммы и результаты расчета

Table 1

Theoretical variograms and calculation results

№ п/п	Теоретическая вариограмма	Значение range («радиус»)	Значение still («порог»)	Значение nugget
1	Кубическая	9,01	3,38	0
2	Экспоненциальная	9,01	3,38	0
3	Гаусса № 1	9,01	3,38	0
4	Гаусса № 2	18	3,38	0
5	Линейная	–	0,14	0
6	Логарифмическая № 1	1	0,01	0
7	Логарифмическая № 2	9,01	1	0
8	Сферическая	9,01	3,38	0
9	Волновая	4,8	3	0

Соблюдение требований СП 47.13330.2016 по расположению геовыработок приводит к тому, что зачастую выбор функции теоретической вариограммы не будет обоснован. Применение различных теоретических функций вариограммы будет создавать различные по простиранию грунтовые условия (рис. 4). Как видно, разделение ИГЭ по исходным данным может быть представлено различным образом. Поэтому необходимо оценить чувствительность результатов расчета к разделению ИГЭ.

Для оценки влияния различных теоретических вариограмм и их значений на осадки фундаментной плиты было проведено численное моделирование в программе Midas GTS NX. Область моделирования (см. рис. 1) имела размеры 70,0×52,0×12,0 м, на поверхности которой по центру находилась железобетонная фундаментная плита размером 30,0×12,0×0,5 м. По обрезу фундаментной плиты действовало распределенное давление 130 кПа. Для исключения влияния сетки конечных элементов на результаты расчета весь массив грунта был выполнен из одинаковых правильных гексаэдрических элементов размером 0,5×0,5×0,25 м в количестве 698 880 штук. Разделение на ИГЭ проводилось полным включением отдельных конечных элементов в набор ИГЭ на основе поверхностей, созданных с использованием

теоретических вариограмм (см. табл. 1). Для ИГЭ принималась упругопластическая модель с критерием прочности Кулона – Мора. Рассматривались два варианта размещения ИГЭ от верхнего к нижнему по схеме: {1, 2}, {2, 1} (табл. 2).

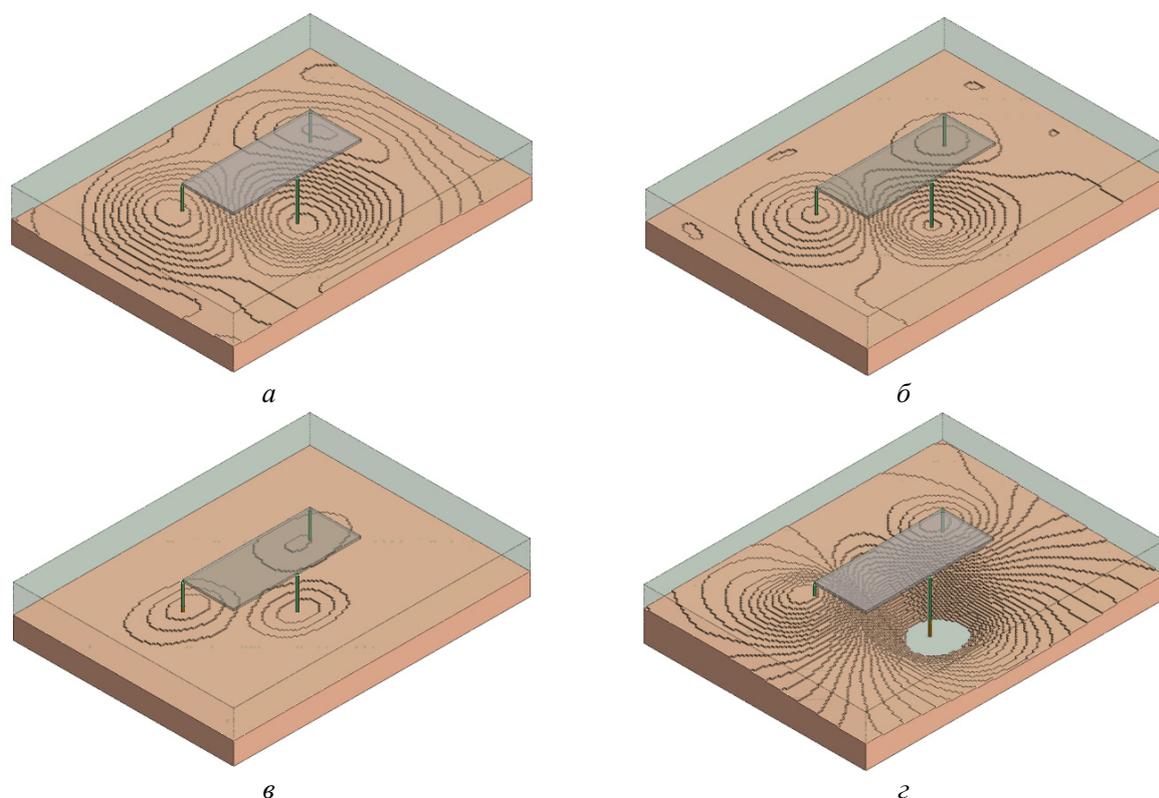


Рис. 4. Разделение ИГЭ с использованием различных теоретических вариограмм:
 а – волновой; б – Гаусса № 1; в – кубической; з – логарифмической № 2.

Верхний ИГЭ для наглядности полупрозрачный

Fig. 4. Separation of soil layers using different theoretical variograms:

а – wave; б – Gaussian no. 1; в – cubic; з – logarithmic no. 2.

The top soil layer is translucent for clarity

Таблица 2

Параметры модели Кулона – Мора для ИГЭ

Table 2

Parameters of the Coulomb-Mohr model for soil layers

ИГЭ	Удельный вес γ , кН/м ³	Модуль упругости E , МПа	Коэффициент Пуассона	Удельное сцепление c , кПа	Угол внутреннего трения φ , град.	Угол дилатансии ψ , град.
1	20	7	0,37	15	15	0
2	18	30	0,3	3	30	0

Результаты и обсуждение

Результаты 18 численных расчетов с различным разделением массива грунта на ИГЭ по схемам {1, 2} и {2, 1} наглядно демонстрируют, что при равномерной передаче давления на грунтовое основание и при отсутствии жесткости наземных конструкций здания происходит незначительное влияние на осадки фундамента: максимальное значение, среднее значение и

относительную неравномерность (табл. 3, рис. 5). Выбор теоретической вариограммы не приводит к существенным отличиям в деформировании фундамента и грунтового основания, коэффициент вариации для значения осадок для всех теоретических вариограмм не превышает 0,046. При исключении теоретической вариограммы «логарифмическая № 2» (рис. 4, з) значение коэффициента вариации осадок снижается до 0,026.

Таблица 3

Теоретические вариограммы и результаты численного расчета

Table 3

Theoretical variograms and calculation results

№ п/п	Теоретическая вариограмма	Осадка фундамента при разделении ИГЭ по схеме {1, 2}			Осадка фундамента при разделении ИГЭ по схеме {2, 1}		
		S_{\max} , см	$S_{\text{ср}}$, см	$\Delta s/L$	S_{\max} , см	$S_{\text{ср}}$, см	$\Delta s/L$
1	Кубическая	10,3	9,1	0,0022	9,99	8,74	0,0021
2	Экспоненциальная	10,6	9,2	0,0025	9,96	8,83	0,0024
3	Гаусса № 1	10,8	9,3	0,0028	10,47	8,93	0,0027
4	Гаусса № 2	11,0	9,5	0,0028	10,34	9,12	0,0027
5	Линейная	10,7	9,4	0,0026	10,38	9,02	0,0024
6	Логарифмическая № 1	10,5	9,2	0,0024	10,08	8,74	0,0023
7	Логарифмическая № 2	11,9	9,7	0,0042	11,31	9,12	0,004
8	Сферическая	10,3	9,1	0,0023	9,89	8,65	0,0022
9	Волновая	11	9,5	0,0028	10,56	9,03	0,0027

Теоретическая вариограмма с логарифмическим описанием (логарифмическая № 2 в табл. 3) существенно искажает исходные данные по геовыработкам. Следствием этого является ошибочное разделение ИГЭ (рис. 4, з) и дальнейшие качественно отличающиеся результаты расчета (рис. 5, ж), но и они несущественно отличаются от результатов параллельных расчетов.

Можно сделать общий вывод, что использование плитного фундамента, передающего равномерно распределенную нагрузку на грунтовое основание, обладает малой чувствительностью к различному разделению массива грунта на ИГЭ – существенного влияния на осадки от выбора теоретической вариограммы и ее значений не происходит. Во многом это объясняется распределительной способностью плитного фундамента и наличием большой активной зоны грунта под его подошвой. В случае учета жесткости наземной конструкции, вероятнее всего, будет происходить еще большее сближение между результатами расчета. Таким образом, создание пространственных геологических условий для проведения численных геотехнических расчетов количественно практически не зависит от принимаемой теоретической вариограммы.

Вывод отчасти сглаживает опасения неопределенности распространения ИГЭ под плитным фундаментом. Даже невозможность подобрать теоретическую вариограмму на основе экспериментальной, не является существенной. Хотя следует указать, что это относится только к малозаглубленным плитным фундаментам и грунтовым условиям 1-й или 2-й категорий сложности.

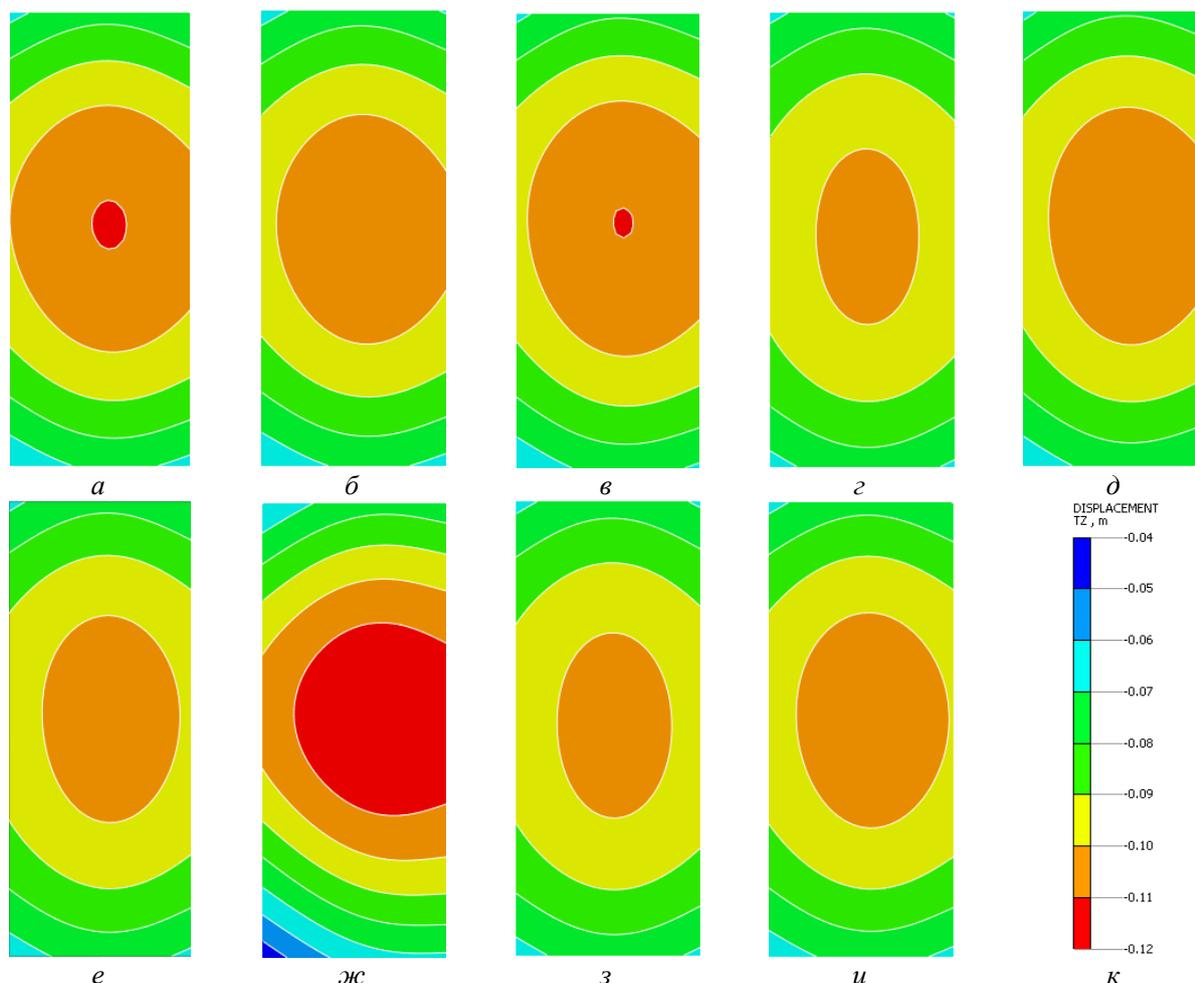


Рис. 5. Изолинии осадки фундаментной плиты при разделении ИГЭ с использованием теоретической вариограммы: *a* – волновой; *б* – гауссовой № 1; *в* – гауссовой № 2; *г* – кубической; *д* – линейной; *е* – логарифмической № 1; *ж* – логарифмической № 2; *з* – сферической; *и* – экспоненциальной; *к* – общая легенда для изолиний

Fig. 5. Isolines of foundation slab settlement when separating soil layers using a theoretical variogram: *a* – wave; *б* – gaussian no. 1; *в* – gaussian no. 2; *г* – cubic; *д* – linear; *е* – logarithmic no. 1; *ж* – logarithmic no. 2; *з* – spherical; *и* – exponential; *к* – general legend for isolines

Заключение

Результаты данного исследования в целом логичны и ожидаемы, однако публикаций, подтверждающих это, нет. Следовательно, утверждение является бездоказательным. Плитный фундамент «прощает» флуктуации разделения ИГЭ. Для этого случая более важным является качество исходных данных, таких как выделение ИГЭ по колонкам и калибровка параметров моделей грунта.

Однако существуют и другие геотехнические задачи, такие как устойчивость откосов и склонов, откопка глубоких котлованов, проектирование фундаментов, отличных от плитных (отдельные, ленточные, свайные), где влияние пространственного выделения ИГЭ еще предстоит изучить.

Создание пространственной инженерно-геологической модели, более достоверно отражающей данные инженерно-геологических изысканий, является все еще достаточно

сложно задачей [29]. Многие авторы предлагают различные варианты ее решения [30, 31], используя как детерминированные, так и стохастические подходы. Использование детерминированного подхода не нарушает эволюционный принцип совершенствования инженерно-геологических изысканий, так как является только уточнением сформированных подходов в геологическом профессиональном сообществе. При этом необходимо проводить не только статистическую обработку по ГОСТ 20522-2012, но и учитывать геостатистические методы с определением области их применения.

Финансирование. Исследование не имело спонсорской поддержки.

Конфликт интересов. Авторы заявляют об отсутствии конфликта интересов.

Вклад авторов. Все авторы сделали равный вклад в подготовку публикации.

Библиографический список

1. Бондарик, Г.К. Теория геологического поля (философские и методологические основы геологии) / Г.К. Бондарик. – М.: КГУ, 2009.
2. Болдырев, Г.Г. Когда можно считать реалистичной стратиграфическую модель площадки изысканий? / Г.Г. Болдырев // Геоинфо. – 2022. – № 5. – С. 20–23.
3. Болдырев, Г.Г. Трехмерное моделирование и визуализация данных инженерно-геологических изысканий. Состояние вопроса и практическая реализация / Г.Г. Болдырев // Инженерные изыскания. – 2022. – № 1(16). – С. 8–26. DOI: 10.25296/1997-8650-2022-16-1-8-26
4. Схематизация свойств грунтов при математическом моделировании в инженерной геологии и геотехнике / И.К. Фоменко, К.В. Кургузов, О.Н. Сироткина, Д.Н. Горобцов // Новые идеи и теоретические аспекты инженерной геологии: тр. междунар. науч. конф., Москва, 4 февраля 2021 г. / под ред. В.Т. Трофимова, В.А. Королева. – М.: Сам Полиграфист, 2021. – С. 223–228.
5. Закревский, К.Е. Оценка точности интерполяционных геологических моделей / К.Е. Закревский, В.Л. Попов // Экспозиция Нефть Газ. – 2017. – № 3(56). – С. 12–14.
6. Barvashov, V.A. Geometrization of laminated soil masses / V.A. Barvashov // Soil Mechanics and Foundation Engineering. – 2006. – Vol. 43, no. 5. – P. 161–167. DOI: 10.1007/s11204-006-0042-2
7. Болдырев, Г.Г. Технология полевых испытаний грунтов методом бурового зондирования / Г.Г. Болдырев, Г.А. Новичков // Вестник Пермского национального исследовательского политехнического университета. Строительство и архитектура. – 2015. – № 1. – С. 64–78. DOI: 10.15593/2224-9826/2015.1.05
8. Кужелев, П.Д. О применении геостатистики в науках о Земле / П.Д. Кужелев // Науки о Земле. – 2012. – № 4. – С. 077–081.
9. Потехин, Д.В. Обзор неопределенностей методов трехмерного геологического моделирования и выбора достоверных моделей / Д.В. Потехин // Проблемы разработки месторождений углеводородных и рудных полезных ископаемых. – 2014. – № 1. – С. 59–62.
10. Антипов, В.В. Современные неразрушающие методы изучения инженерно-геологического разреза / В.В. Антипов, В.Г. Офрихтер // Вестник Пермского национального исследовательского политехнического университета. Строительство и архитектура. – 2016. – Т. 7, № 2. – С. 37–49. DOI: 10.15593/2224-9826/2016.2.04
11. Демьянов, В.В. Геостатистика: теория и практика / В.В. Демьянов, Е.А. Савельева. – М.: Наука, 2010. – 327 с.

12. Kovalevskiy, E.V. Geostatistical estimation of different interpolation techniques / E.V. Kovalevskiy, M.V. Perepechkin // Saint Petersburg 2012 – 5th Saint Petersburg International Conference & Exhibition 2012: Making the Most of the Earth's Resources: Proseedings, Saint Petersburg, 2–5 апреля 2012 г. – Saint Petersburg: European Association of Geoscientists & Engineers, 2012.
13. Барвашов, В.А. Расчет осадок и кренов сооружений с учетом неопределенности свойств грунтовых оснований / В.А. Барвашов, Г.Г. Болдырев, М.М. Уткин // Геотехника. – 2016. – № 1. – С. 4–21.
14. Комплексная технология инженерно-геологических изысканий / Г.Г. Болдырев, В.А. Барвашов, И.Х. Идрисов, О.В. Хрянина // Вестник Пермского национального исследовательского политехнического университета. Строительство и архитектура. – 2017. – Т. 8, № 3. – С. 22–33. DOI: 10.15593/2224-9826/2017.3.03
15. Кургузов, К.В. Вероятностно-статистические подходы при оценке неопределенности литотехнических систем / К.В. Кургузов, И.К. Фоменко, О.Н. Сироткина // Геоэкология. Инженерная геология, гидрогеология, геокриология. – 2020. – № 2. – С. 80–89. DOI: 10.31857/S0869780920020071
16. Ахметсафина, А.Р. Стохастические методы в программе геологического моделирования / А.Р. Ахметсафина, И.Р. Миннихметов, А.Х. Пергамент // Вестник ЦКР Роснедра. – 2010. – № 1. – С. 34–46.
17. Yucheng, Wu. Stochastic model updating based on kriging model and lifting wavelet transform / Wu. Yucheng, Y. Hong, P. Zhenrui // Applied Mathematics and Mechanics. – 2022. – Vol. 43, no. 7. – P. 761–771. DOI: 10.21656/1000-0887.420128
18. Fenton, G.A. Estimation for stochastic soil models / G.A. Fenton // Journal of Geotechnical and Geoenvironmental Engineering. – 1999. – № 6(125). – P. 470–485. DOI: 10.1061/(ASCE)1090-0241(1999)125:6(470)
19. Федоров, А.Э. Анализ геологической неопределенности при стохастическом моделировании геологических тел / А.Э. Федоров, А.А. Аминева, И.Р. Дильмухаметов // Нефтяное хозяйство. – 2019. – № 9. – С. 24–28. DOI: 10.24887/0028-2448-2019-9-24-28
20. Chakraborty, R. Stochastic modeling of the spatial variability of soil / R. Chakraborty, A. Dey // Advances in Numerical Methods in Geotechnical Engineering. GeoMEast 2018. – 2019. – P. 144–155. DOI: 10.1007/978-3-030-01926-6_11
21. Creation of 3D geological models using interpolation methods for numerical modelling / J. Muzik, T. Vondráčková, D. Sitányiová, J. Plachý, V. Nývlt // Procedia Earth and Planetary Science. – 2015. – Vol. 15. – P. 25–30. DOI: 10.1016/j.proeps.2015.08.007
22. Mixed covariance function kriging model for uncertainty quantification / K. Cheng, Z. Lu, S. Xiao, S. Oladyshkin, W. Nowak // International Journal for Uncertainty Quantification. – 2022. – № 3(12). – P. 17–30. DOI: 10.1615/Int.J.UncertaintyQuantification.2021035851
23. Study of drillability evaluation in deep formations using the kriging interpolation method / Y. Zhang, M. Duan, X. Kong, T. Sun, F. Yang // Chemistry and Technology of Fuels and Oils. – 2018. – № 3(54). – P. 382–385. DOI: 10.1007/s10553-018-0936-5
24. Шестаков, В.В. Адаптация метода двойного крайгинга к структурным факторам геологической среды / В.В. Шестаков, О.М. Гергет // Научный вестник Новосибирского государственного технического университета. – 2020. – № 1(78). – С. 119–134. DOI: 10.17212/1814-1196-2020-1-119-134
25. Шестаков, В.В. Влияние репрезентативности исходных данных на результаты моделирования методом двойного крагинга / В.В. Шестаков, Д.Ю. Степанов // Izvestiya

Tomskogo Politekhnicheskogo Universiteta Inziniring Georesursov. – 2019. – № 1(330). – С. 88–97. DOI: 10.18799/24131830/2019/1/53

26. Болдырев, Г.Г. О программном средстве для практического применения геостатистики в геологии и геотехнике / Г.Г. Болдырев // *Геоинфо*. – 2022. – № 12. – С. 8–37. DOI: 10.58339/2949-0677-2022-4-12-8-37

27. Preisig, M. Interpolating geological layers with Kriging [Электронный ресурс] / M. Preisig. – URL: https://www.zsoil.com/zsoil_day/2016/M_Preisig_Kriging.pdf. (дата обращения: 30.06.2024).

28. Кургузов, К.В. Пространственно-корреляционный анализ инженерно-геологических данных на примере строительства логистического комплекса / К.В. Кургузов, И.К. Фоменко // *Вестник МГСУ*. – 2019. – Т. 14, № 8. – С. 976–990. DOI: 10.22227/1997-0935.2019.8.976-990

29. Болдырев, Г.Г. Инженерно-геологические исследования с использованием цифровых технологий / Г.Г. Болдырев, Д.А. Луковкин, П.А. Анохин // *Инженерные изыскания*. – 2022. – Т. 16, № 3. – С. 12–32. DOI: 10.25296/1997-8650-2022-16-3-12-32

30. Барвашов, В.А. О некоторых парадоксах нормативных документов и традиционных подходов к инженерно-геологическим изысканиям / В.А. Барвашов, Г.Г. Болдырев // *Инженерные изыскания*. – 2016. – № 12. – С. 10–15.

31. Болдырев, Г.Г. Информационные системы в строительстве / Г.Г. Болдырев, А.Ю. Кондратьев // *Жилищное строительство*. – 2019. – № 9. – С. 17–23. DOI: 10.31659/0044-4472-2019-9-17-23

References

1. Bondarik G.K. *Teoriya geologicheskogo polya (filosofskiye i metodologicheskiye osnovy geologii)* [Theory of the geological field (philosophical and methodological foundations of geology)]/ Moscow, KGU, 2009.

2. Boldyrev G.G. *Kogda mozhno schitat' realistichnoy stratigraficheskuyu model' ploshchadki izyskaniy?* [When can a stratigraphic model of a survey site be considered realistic?]. *Geoinfo*, 2022, vol. 5, pp. 20-23.

3. Boldyrev G.G. *Trekhmernoye modelirovaniye i vizualizatsiya dannykh inzhenerno-geologicheskikh izyskaniy. Sostoyaniye voprosa i prakticheskaya realizatsiya* [Three-dimensional modeling and visualization of engineering-geological survey data. State of the art and practical implementation]. *Inzhenernyye izyskaniya*, 2022, vol. 16, pp. 8-26. DOI: 10.25296/1997-8650-2022-16-1-8-26.

4. Fomenko I. ., Kurguzov K.V., Sirotkina O.N., Gorobtsov D.N. *Skhematizatsiya svoystv gruntov pri matematicheskom modelirovanii v inzhenernoy geologii i geotekhnike* [Schematic representation of soil properties in mathematical modeling in engineering geology and geotechnics]. *Proceedings of the Novyye idei i teoreticheskiye aspekty inzhenernoy geologii: Trudy Mezhdunarodnoy nauchnoy konferentsii (Moskva, 04 February 2021 goda)*. Eds. V.T. Trofimov, V.A. Korolov. Moscow, Sam Poligrafist, 2021, pp. 223-228.

5. Zakrevskiy K.Ye., Popov V.L. *Otsenka tochnosti interpolyatsionnykh geologicheskikh modeley* [Evaluation of the accuracy of interpolation geological models]. *Ekspozitsiya Neft' Gaz*, 2017, vol. 3(56), pp. 12-14.

6. Barvashov V.A. *Geometrization of laminated soil masses. Soil Mechanics and Foundation Engineering*, 2006, vol. 43, pp. 161-167. DOI:10.1007/s11204-006-0042-2.

7. Boldyrev G.G., Novichkov G.A. Tekhnologiya polevykh ispytaniy gruntov metodom burovogo zondirovaniya [Technology of field testing of soils by the method of drilling probing]. *Vestnik Permskogo natsional'nogo issledovatel'skogo politekhnicheskogo universiteta. Stroitel'stvo i arkhitektura*, 2015, no. 1, pp. 64-78. DOI: 10.15593/2224-9826/2015.1.05
8. Kuzhelev P.D. O primenenii geostatistiki v naukakh o Zemle [On the Application of Geostatistics in Earth Sciences]. *Nauki o Zemle*, 2012, vol. 4, pp. 77-81.
9. Potekhin D.V. Obzor neopredelennostey metodov trekhmernogo geologicheskogo modelirovaniya i vybora dostovernykh modeley [Review of uncertainties in 3D geological modeling methods and selection of reliable models]. *Problemy razrabotki mestorozhdeniy uglevodorodnykh i rudnykh poleznykh iskopayemykh*, 2014, vol. 1, pp. 59-62.
10. Antipov V.V., Ofrikhter V.G. Sovremennyye nerazrushayushchiye metody izucheniya inzhenerno-geologicheskogo razreza. [Modern non-destructive methods for studying engineering-geological section]. *Vestnik Permskogo natsional'nogo issledovatel'skogo politekhnicheskogo universiteta. Stroitel'stvo i arkhitektura*, 2016, vol. 7, no. 2, pp. 37-49. DOI: 10.15593/2224-9826/2016.2.04
11. Dem'yanov V.V. Savel'yeva Ye. A. Geostatistika: teoriya i praktika [Geostatistics: Theory and Practice]. Moscow, Nauka, 2010.
12. Kovalevskiy E.V. Perepechkin M.V. () Geostatistical estimation of different interpolation techniques. *Proceedings of the 5th Saint Petersburg International Conference & Exhibition 2012: Making the Most of the Earth's Resources (Saint Petersburg, April 02–05, 2012)*, Saint Petersburg, 2012.
13. Barvashov V.A., Boldyrev G.G., Utkin M.M. Raschet osadok i krenov sooruzheniy s uchetom neopredelennosti svoystv gruntovykh osnovaniy [Calculation of settlements and tilts of structures taking into account the uncertainty of the properties of soil foundations]. *Geotekhnika*, 2016, vol. 1, pp. 4-21.
14. Boldyrev G.G., Barvashov V.A., Idrisov I.KH., Khryanina O.V. Kompleksnaya tekhnologiya inzhenerno-geologicheskikh izyskaniy [Integrated technology of engineering-geological surveys]. *Vestnik Permskogo natsional'nogo issledovatel'skogo politekhnicheskogo universiteta. Stroitel'stvo i arkhitektura*, 2017, vol. 8, no. 3, pp. 22-33. DOI: 10.15593/2224-9826/2017.3.03.
15. Kurguzov K.V., Fomenko I.K., Sirotkina O.N. Veroyatnostno-statisticheskiye podkhody pri otsenke neopredelennosti litotekhnicheskikh system [Probabilistic-statistical approaches to assessing the uncertainty of lithotechnical systems]. *Geoekologiya. Inzhenernaya geologiya, gidrogeologiya, geokriologiya*, 2020, vol. 2, pp. 80-89. DOI: 10.31857/S0869780920020071.
16. Akhmetsafina A.R., Minniakhmetov I.R., Akhmetsafina A.R., Pergament K.H. Stokhasticheskiye metody v programme geologicheskogo modelirovaniya [Stochastic methods in geological modeling software]. *Vestnik TSKR Rosnedra*, 2010, no. 1, pp. 34-46.
17. Yucheng Wu., Hong Y., Zhenrui P. Stochastic model updating based on kriging model and lifting wavelet transform. *Applied Mathematics and Mechanics*, 2022, vol. 43, no. 7, pp. 761-771. doi: 10.21656/1000-0887.420128.
18. Fenton G.A. Estimation for Stochastic Soil Models. *Journal of Geotechnical and Geoenvironmental Engineering*, 1999, vol. 6(125), pp. 470–485. DOI:10.1061/(ASCE)1090-0241(1999)125:6(470).
19. Fedorov A.E., Amineva A.A., Dil'mukhametov I.R. Analiz geologicheskoy neopredelennosti pri stokhasticheskom modelirovanii geologicheskikh tel [Analysis of geological uncer-

tainty in stochastic modeling of geological bodies]. *Neftyanoye khozyaystvo*, 2019, vol. 9, pp. 24-28. DOI: 10.24887/0028-2448-2019-9-24-28.

20. Chakraborty R., Dey A. Stochastic modeling of the spatial variability of soil. *Advances in Numerical Methods in Geotechnical Engineering*. GeoMEast 2018, 2019, pp. 144–155. DOI: https://doi.org/10.1007/978-3-030-01926-6_11.

21. Muzik J., Vondráčková T., Sitányiová D., Plachý J., Nývlt V. Creation of 3D Geological Models Using Interpolation Methods for Numerical Modelling. *Procedia Earth and Planetary Science*, 2015, vol. 15, pp. 25–30. DOI:10.1016/j.proeps.2015.08.007.

22. Cheng K., Lu Z., Xiao S., Oladyshekin S., Nowak W. Mixed covariance function kriging model for uncertainty quantification. *International Journal for Uncertainty Quantification*, 2022, vol. 3(12), pp. 17–30. DOI:10.1615/Int.J.UncertaintyQuantification.2021035851.

23. Zhang Y., Duan M., Kong X., Sun T., Yang F. Study of drillability evaluation in deep formations using the kriging interpolation method. *Chemistry and Technology of Fuels and Oils*, 2018, vol. 3(54), pp. 382–385. DOI:10.1007/s10553-018-0936-5.

24. Shestakov V.V., Gerget O.M. Adaptatsiya metoda dvoynogo krayginga k strukturnym faktoram geologicheskoy sredy [Adaptation of the double kriging method to structural factors of the geological environment]. *Nauchnyy vestnik Novosibirskogo gosudarstvennogo tekhnicheskogo universiteta*, 2022, vol. 1(78), pp. 119-134. DOI: 10.17212/1814-1196-2020-1-119-134.

25. Shestakov V.V., Stepanov D.YU. Vliyaniye reprezentativnosti iskhodnykh dannykh na rezul'taty modelirovaniya metodom dvoynogo krayginga [The influence of the representativeness of the initial data on the results of modeling using the double kriging method]. *Izvestiya Tomskogo Politehnicheskogo Universiteta Inzhiniring Georesursov*, 2019, vol. 1(330), pp. 88–97. DOI:10.18799/24131830/2019/1/53.

26. Boldyrev G.G. O programmnom sredstve dlya prakticheskogo primeneniya geostatistiki v geologii i geotekhnike [About software for practical application of geostatistics in geology and geotechnics]. *Geoinfo*, 2022, vol. 12, pp. 8-37. DOI: 10.58339/2949-0677-2022-4-12-8-37.

27. Preisig M. Interpolating geological layers with Kriging. 2016. Available at: https://www.zsoil.com/zsoil_day/2016/M_Preisig_Kriging.pdf (30 Yuni 2024).

28. Kurguzov K.V., Fomenko I.K. Prostranstvenno-korrelyatsionnyy analiz inzhenerno-geologicheskikh dannykh na primere stroitel'stva logisticheskogo kompleksa [Spatial correlation analysis of engineering and geological data using the example of construction of a logistics complex]. *Vestnik MGSU*, 2019, vol. 14, no. 8, pp. 976-990. DOI:10.22227/1997-0935.2019.8.976-990.

29. Boldyrev G.G., Lukovkin D.A., Anokhin P.A. Inzhenerno-geologicheskkiye issledovaniya s ispol'zovaniyem tsifrovyykh tekhnologiy [Engineering and geological research using digital technologies]. *Inzhenernyye izyskaniya*, 2022, vol. 16, no. 3, pp. 12-32. DOI: 10.25296/1997-8650-2022-16-3-12-32.

30. Barvashov V.A., Boldyrev G.G. O nekotorykh paradoksakh normativnykh dokumentov i traditsionnykh podkhodov k inzhenerno-geologicheskim izyskaniyam [On some paradoxes of regulatory documents and traditional approaches to engineering and geological surveys]. *Inzhenernyye izyskaniya*, 2019, vol. 12, pp. 10-15.

31. Boldyrev G.G., Kondrat'yev A.YU. Informatsionnyye sistemy v stroitel'stve [Information systems in construction]. *Zhilishchnoye stroitel'stvo*, 2019, vol. 9, pp. 17-23. DOI: 10.31659/0044-4472-2019-9-17-23.