Пространственно-корреляционный анализ инженерно-геологических данных на примере строительства логистического комплекса

К.В. Кургузов, И.К. Фоменко

*Российский государственный геологоразведочный университет имени Серго Орджоникидзе (МГРИ);
г. Москва, Россия*

АННОТАЦИЯ

Введение: геостатистическая методология широко используется в настоящее время за рубежом для построения пространственно-корреляционных и пространственно-стохастических моделей литотехнических систем, в том числе для описания и анализа неоднородности грунтовых массивов. Цель исследования — оценка возможности построения пространственно-корреляционной модели литотехнического пространства на основе материалов изысканий для применения в последующем моделировании и анализе многомерных стохастических полей, при проектировании оснований и фундаментов.

Материалы и методы: в качестве вводных параметров использованы материалы инженерно-геологических изысканий исследуемой территории, в том числе результаты выполнения полевых испытаний грунтов методом статического зондирования. Данные проанализированы посредством методов описательной статистики, с расчетом частных и общих значений генеральных статистик, с построением и анализом функций распределения случайных величин, с применением статистического программного комплекса STATISTICA. Последующее использование результатов статистического анализа направлено на применение геостатистических моделей интерполяции (кригинг) для построения пространственных структур деформационных характеристик. В качестве валидации разработанных пространственных структур разработаны экспериментальные корреляционные функции (вариограммы), показывающие не только обоснованность пространственного моделирования, но и уровень неоднородности исследуемого массива.

Результаты: если статистический анализ исходных данных показал относительную однородность свойств исследуемого массива, что обосновано указаниями ГОСТ 20522, то на основе геостатистического анализа сделано противоположное заключение. Это обусловлено в первую очередь недостатком информации об исследуемой геологической среде.

Выводы: требования действующего ГОСТ 20522 не содержат достаточного количества информации для выполнения геостатистического анализа и моделирования грунтового массива основанного на современных геостатистических методах. Как результат, материалы стандартных инженерно-геологических исследований не могут быть использованы для разработки цифровых моделей оснований, а также для применения вероятностных подходов в геотехнике.

КЛЮЧЕВЫЕ СЛОВА: вероятностные подходы, пространственно-корреляционная модель, геостатистическая методология, пространственный анализ данных, кригинг, детерминистические интерполяторы, вариограммное моделирование, анализ неопределенности, гетерогенность грунтов

ДЛЯ ЦИТИРОВАНИЯ: Кургузов К.В., Фоменко И.К. Пространственно-корреляционный анализ инженерно-геологических данных на примере строительства логистического комплекса // Вестник МГСУ. 2019. Т. 14. Вып. 8. С. 976–990. DOI: 10.22227/1997-0935.2019.8.976-990

Spatial and correlation analysis of engineering-geological survey data for logistics center construction

Konstantin V. Kurguzov, Igor K. Fomenko

*Sergo Ordzhonikidze Russian State University for Geological Prospecting (MGRI);
Moscow, Russian Federation*

ABSTRACT

Introduction: at present, the geostatistical methodology is broadly used abroad for constructing spatial-correlation and spatial-stochastic models of lithoengineering systems, including description and analysis of soil body heterogeneity. The main goal of this work is an attempt to evaluate the possibility of generating a spatial-correlation model of lithoengineering space based on survey data which could be used for subsequent simulation and deterministic-stochastic analysis of geotechnical structures as well as when designing bases and foundations.

Materials and methods: main input parameters for spatial analysis were geological survey report and cone-penetration test (CPT) data. The data were analyzed using descriptive statistic methods, with the calculation of particular and ambiguous

values and using statistical software STATISTICA. Later use of the results of the statistical analysis aims at the application of geostatistical interpolation models (kriging) for generating spatial structures of deformation features. The article elaborates experimental correlation functions (variograms) to validate the developed spatial structures. The functions show not only the validity of the spatial simulation but also a level of heterogeneity of the researched soil body.

Results: the statistical analysis of the initial data showed relative homogeneity of the researched soil body properties what is substantiated by GOST 20522 instructions. Nevertheless, the geostatistical analysis resulted in the opposite conclusion. Principally, this is due to the lack of information on the researched geological medium.

Conclusions: requirements of current Russian standard GOST 20522 do not contain a sufficient amount of information for geostatistical analysis and simulation of a soil body based on modern geostatistical methods. As a result, data of standard engineering-geological researches cannot be used for developing digital foundation models as well as for using probabilistic approaches in geotechnics.

KEYWORDS: a stochastic approach, spatial-correlation model, geostatistical methodology, spatial data analysis, kriging, deterministic interpolators, variogram-based simulation, uncertainty analysis, soil heterogeneity

FOR CITATION: Kurguzov K.V., Fomenko I.K. Spatial and correlation analysis of engineering-geological survey data for logistics center construction. *Vestnik MGSU* [Monthly Journal on Construction and Architecture]. 2019; 14(8):976-990. DOI: 10.22227/1997-0935.2019.8.976-990 (rus.).

ВВЕДЕНИЕ

Количественная оценка надежности оснований и фундаментов, зданий и сооружений на основе вероятностного подхода — объективная мера принимаемых технических решений, которая используется уже на протяжении нескольких десятилетий за рубежом [1]. Вероятностный подход имеет существенное преимущество по сравнению с используемыми в прошлом методами предельных напряжений и действующими в современной инженерной практике методами предельных состояний. Оценку надежности системы можно получить только при условии вероятностного расчета системы и вероятностного прогноза возможных деформаций оснований [2]. В нашей стране подробно вероятностно-статистическими подходами в прошлом занимались А.П. Пшеничкин, А.Р. Ржаницын, В.В. Болотин, А.Б. Вистелиус, В.Д. Райзер и др. Существующие детерминированные аналитические и численные методы, используемые в расчетах конструкций, оснований и фундаментов являются лишь частными методами вероятностно-статистических подходов. Так, В.В. Болотин указывал, что правильное решение проблемы надежности и долговечности конструкций и оснований фундаментов возможно лишь с привлечением теории случайных функций [3].

Вероятностный подход при освоении территорий и строительстве сооружений сопряжен с применением методологии геостатистического анализа данных [4]. Для построения расчетной вероятностной (стохастической) модели «сооружение–основание» как решение первичной задачи, требуется про-

странственное описание изменчивости грунтовых параметров, т.е. формирование пространственно-корреляционной модели грунтового массива. Пространственное моделирование напрямую связано с получением информации об исследуемой области, т.е. с проведением инженерно-геологических изысканий и статистической обработкой материалов исследований при использовании аппарата математической статистики [5, 6].

Вышесказанное предопределяет необходимость применения геостатистической методологии, которая должна выполняться на всех этапах реализации проекта от инженерно-геологических изысканий до стадии эксплуатации (на этапе проведения работ по мониторингу). В этой технологической цепочке геостатистического анализа самый важный этап — выполнение инженерно-геологических изысканий: выполнение полевых работ, лабораторных исследований, интерпретации полученных значений переменных, построение пространственно-корреляционной модели. Инженерно-геологические изыскания низкого качества не могут находиться в основе достоверного инженерного расчета и эффективного проектного решения.

Пространственно-корреляционные геостатистические модели основаны на детерминированных геостатистических подходах, в основе которых лежат методы вариографии и методы интерполяции (кригинга) на пространственно-стохастическом моделировании [7, 8].

Пространственно-стохастическое моделирование, как раздел геостатистики, в своей основе использует методы статистическо-вероятностного

анализа. Данный раздел геостатистики включает в себя такие методы, как индикаторное моделирование, совместное моделирование, геостатистическая инверсия и пр. [9, 10].

С помощью методов анализа пространственных данных могут решаться следующие задачи [11]:

- оценка значений характеристик грунтов в точке, где измерение не проводилось;
- построение цифровых моделей грунтовых массивов с базами данных физико-механических свойств грунтов;
- формирование графических моделей с возможным выводом статистической информации интересующих величин в любой точке массива;
- оценка ошибок интерполяционного анализа;
- оценка значения переменной, по которой мало измерений, используя значения другой коррелированной с ней переменной, по которой проведено много измерений;
- определение вероятности превышения значения в интересующей области;
- определение набора равновероятных стохастических пространственных реализаций распределения наблюдаемой переменной.

Геостатистическая методология позволяет выполнять анализ корреляционных структур физико-механических параметров грунта и разрабатывать пространственно-корреляционные модели, отражающие стратиграфическое строение массива,

изменчивость и неоднородность свойств [12–16]. Описание грунтовой гетерогенности методами геостатистики является серьезным основанием для применения объективных вероятностных методик в проектировании геотехнических объектов по сравнению с традиционной практикой инженерных расчетов, базирующихся преимущественно на детерминированных моделях и методах [17].

МАТЕРИАЛЫ И МЕТОДЫ

Для отображения методов и способов анализа пространственных данных в работе проанализированы материалы инженерно-геологических изысканий, которые проводились в 2012 г. для строительства большепролетных складских корпусов логистического парка в Домодедовском районе Московской области. В качестве фундаментов складских корпусов использовались отдельно стоящие столбчатые железобетонные фундаменты.

Территория участка — достаточно большая, площадь составляет более 110 га. Инженерно-геологические условия относятся ко II-й категории сложности.

В целях настоящего исследования было принято решение провести пространственно-корреляционный анализ только для указанной расчетной области (рис. 1) и только для одного инженерно-геологического слоя ИГЭ-7, который имеет самое большое простираение в литологическом пространстве.

Рис. 1. Исследуемая расчетная область

Fig. 1. Researched design area

Табл. 1. Физические свойства рассматриваемых грунтов

Table 1. Physical properties of considered soils

№ п.п. / Item numbers	Наименование показателей / Denotation of indicators	Кол-во определений / Number of tests	Предельные значения / Ultimate values	Среднее значение / Average value	Коэффициент вариации / Coefficient of variation
1	Природная влажность, д.ед. / Natural dampness, decimal fraction	16	0,12–0,15	0,13	0,09
2	Влажность на границе текучести, д.ед. / Dampness at upper plasticity limit, deci- mal fraction	16	0,22–0,28	0,24	0,07
3	Влажность на границе раскатывания, д.ед. / Dampness at lower plasticity limit, deci- mal fraction	16	0,13–0,16	0,14	0,07
4	Число пластичности, д.ед. / Plasticity index, decimal fraction	16	0,09–0,12	0,10	–
5	Плотность грунта, г/см ³ / Soil density, g/cm ³	16	2,17–2,24	2,21	0,01
6	Плотность сухого грунта, г/см ³ / Dry soil density, g/cm ³	16	1,89–1,99	1,94	–
7	Плотность минеральных частиц, г/см ³ / Mineral particle density, g/cm ³	16	2,70–2,72	2,71	0,003
8	Коэффициент пористости / Porosity factor	16	0,35–0,43	0,39	–
9	Степень влажности, д.ед. / Dampness degree, decimal fraction	16	0,89–0,99	0,93	–

Для выполнения геостатистического анализа применялся программный пакет STATISTICA.

Исследуемый инженерно-геологический элемент расположен на всей территории строительства на глубине в среднем 4...8 м (рис. 2), фрагмент инженерно-геологического разреза по линии II–II. Подошва слоя не была вскрыта при бурении, поэтому его мощность не установлена. Исследуемый слой — отложения днепровской морены (gQII_{dn}) (ИГЭ-7), которые вскрыты практически повсеместно (за исключением скв. 336–338 глубиной 3,0–5,0 м) преимущественно под надморенными флювиогляциальными отложениями, представлены суглинками твердыми и полутвердыми, коричневыми, красновато- и буровато-коричневыми, опесчаненными, с маломощными (до 15–20 см) прослоями песка, с включением крупнообломочного материала до 15–20 % и отдельными валунами. Максимальная вскрытая мощность рассматриваемых отложений составила 12,7 м (скв. 285). Данный слой имеет весьма широкое простирание — более одного километра в каждом направлении. Обобщенные показатели физических свойств рассматриваемых грунтов приведены в табл. 1.

Геологические изыскания проводились строго в соответствии с требованиями нормативно-зако-

нотательных актов, а отчет о выполнении инженерно-геологических работ получил положительное заключение государственной экспертизы и являлся основанием для разработки проектной документации конструктивного раздела. В процессе изысканий было пробурено 115 скважин глубиной 17,0 м. Общий объем бурения составил 1955,0 м.

В геоморфологическом отношении площадка предполагаемого строительства приурочена к фрагменту Москворецко-Окской моренно-эрозийной равнины. Абсолютные отметки поверхности земли на момент проведения изысканий зафиксированы инструментально в пределах от 175,31 до 186,19 м (по устьям скважин).

Гидрогеологические условия исследованной территории до глубины 17,0 м на момент проведения изысканий (май–июнь 2012 г.) характеризуются наличием подземных вод локального спорадически распространенного четвертичного водоносного горизонта.

Изучая предложенные геологами физико-механические характеристики данного слоя сложно воздержаться от вопроса — насколько корректно давать описание дисперсного слоя грунта при широком его простирании всего лишь одной характеристикой

Абсолютные отметки, м /
Absolute heights, m

Наименования и номера выработок / Borehole denotations and numbers	Скв. 107 / Borehole 107	Скв. 108 / Borehole 108	Скв. 109 / Borehole 109
Абсолютные отметки, м / Absolute heights, m	181,64	182,81	182,94
Расстояние между выработками, м / Distance between boreholes, m		39,20	40,00

Рис. 2. Фрагмент инженерно-геологического разреза по линии II–II

Fig. 2. Fragment of engineering and geological section along II–II line

среднего значения? Это, конечно, соответствует требованию действующего ГОСТ 20522¹, но едва ли снижает неопределенность при решении проектных задач, потому что ни среднее значение, ни коэффициент вариации полностью не отражают структуру неоднородности и анизотропии рассматриваемого грунтового массива. К тому же величина среднего значения не дает проектировщику ответа на вопрос о величине переменной в пространстве, там, где не проводились исследования грунта, т.е. между геологическими выработками и точками зондирования. Грубое осреднение данных физико-механических характеристик, особенно больших по простиранию слоев грунта, отрицательно влияет на качество принятия технических решений и на эффективность проекта в целом.

Выполнение данного расчета преследовало следующие цели:

- построение пространственной модели, отражающей изменение статистических характеристик по простиранию и получению количественной информации о данных характеристиках в неисследованных областях;
- проведение анализа неоднородности деформационных свойств грунтового массива (на примере модуля деформации);
- обоснование возможности применения методологии геостатистики при данном составе и объеме инженерно-геологических изысканий;
- обоснование целесообразности применения базовых методов геостатистики в практической деятельности инженера-геолога.

В данном примере решалась задача изучения корреляционной структуры пространственных данных на основе построения экспериментальных вариограмм и корреляционных функций.

В качестве основных исходных параметров в этой работе приняты значения статического зондирования, которое выполнялось в процессе инженерно-геологического исследования территории.

Испытания грунтов статическим зондированием выполнены в точках зондирования, расположенных по регулярной сетке, преимущественно с шагом 40×40 м (рис. 1). Зондирование выполнялось с целью детализации геологического разреза и получения количественной оценки физико-механических характеристик исследуемых грунтов. Статическое зондирование выполнено в непосредственной близости с пройденными скважинами.

Зондирование выполнялось в соответствии с требованиями нормативных документов навесным устройством НУСЗ-15 на базе буровой установки

ПБУ-2 с использованием зонда с наконечником, состоящим из конуса, муфты трения, уширителя (тип II) и комплекта регистрирующей аппаратуры ПИКА-15 конструкции НИИ оснований и подземных сооружений (НИИОСП).

По результатам лабораторных исследований грунтов при полном водонасыщении, среднее значение модуля деформации составило 5,32 МПа (коэффициент вариации $\nu = 0,18$), с учетом корректировочного коэффициента $M_k = 5,00$ значение модуля деформации составило 27 МПа, которое рекомендовалось геологами в качестве нормативного и расчетного. Также по их материалам, полученным при испытании грунта в массиве методом статического зондирования средневзвешенное значение удельного лобового сопротивления составило $q_3 = 3,7$ МПа (коэффициент вариации $\nu = 0,25$), что соответствует модулю деформации равному 31 МПа.

В рамках данного исследования был выполнен перерасчет значений модуля деформации E по предоставленным данным результатов статического зондирования и произведен пространственно-корреляционный анализ, как для параметра наиболее широко используемого в основополагающих моделях поведения грунтов [18]. Перерасчет выполнялся на основе корреляционных уравнений для статического зондирования предложенных сотрудниками Пензенского государственного университета архитектуры и строительства А.В. Мельниковым и Г.Г. Болдыревым [19].

РЕЗУЛЬТАТЫ ИССЛЕДОВАНИЯ

Для выполнения пространственно-корреляционного анализа инженерно-геологического элемента (ИГЭ-7) первым шагом являлась статистическая обработка полученных значений модуля деформации E , по которым можно сделать предварительные выводы об однородности этого показателя. Статистический анализ проводился для каждой отдельной точки зондирования и для всех совокупных данных. Результаты статистических расчетов по частным точкам зондирования представлены в виде графиков плотностей распределения значений переменных на рис. 3. Численные значения статистик представлены в табл. 2. Здесь следует обратить внимание, что значения коэффициентов вариации превышают регламентируемое значение в 30 % только по двум точкам Т111 ($V = 33,3$ %) и Т133 ($V = 36,1$ %). Также интересно, что по уровням значений эксцесса и по критерию Шапиро – Вилка, гипотезе о нормальном Гауссовом распределении данных соответствуют только две совокупности в точках зондирования Т109 и Т133. Совмещение графиков плотностей модуля деформации в одной системе координат дает

¹ ГОСТ 20522-2012. Грунты. Методы статистической обработки результатов испытаний. URL: <http://docs.cntd.ru/document/1200096130> (дата обращения: 07.07.2019).

Рис. 3. Совокупность плотностей нормального распределения по точкам статического зондирования

Fig. 3. Combined normal probability density functions by CPT points

Рис. 4. Суммарная плотность распределения значений модуля деформации E по данным расчета статического зондирования: 1 — нормальное распределение; 2 — логнормальное распределение

Fig. 4. The summary probability density function of deformation modulus values based on CPT test: 1 — normal distribution; 2 — lognormal distribution

Табл. 2. Результат статистического анализа данных оценки модуля деформации по статическому зондированию

Table 2. Statistical analysis results of deformation modulus calculations based on CPT tests

Точки зондирования / Test points	Размер выборки, шт. / Sampling size, pcs	Среднее значение, МПа / Average value, MPa	Минимальное значение, МПа / Minimal value, MPa	Максимальное значение, МПа / Maximal value, MPa	Нижний квартиль / Lower quartile	Верхний квартиль / Upper quartile	Стандартное отклонение, МПа / Standard deviation, MPa	Коэффициент вариации / Coefficient of variation	Стандартная ошибка / Standard error	Асимметрия / Asymmetry	Экссесс / Excess	Критерий Шапиро – Вилка / Shapiro-Wilk criterion	Уровень значимости, p / Significance level, p
T105	17	44,2	33,4	80,9	38,5	46,3	10,7	24,3	2,602	2,6	9,0	0,716	0,00018
T107	54	31,5	21,4	62,7	27,2	33,9	7,4	23,5	1,006	1,9	5,1	0,853	0,00001
T109	21	49,8	45,0	58,6	47,0	51,5	3,6	7,1	0,776	0,8	0,4	0,938	0,20604
T111	38	25,9	16,4	45,7	19,7	34,1	8,6	33,3	1,396	1,0	-0,6	0,812	0,00002
T116	59	37,9	22,6	87,2	30,6	42,6	10,4	27,5	1,356	2,1	8,0	0,846	0,00000
T113	6	29,3	23,2	33,0	24,8	32,0	4,2	14,2	1,702	-0,9	-1,5	0,793	0,05136
T122	42	38,0	27,5	63,6	34,4	41,0	6,2	16,3	0,957	1,6	6,0	0,883	0,00048
T125	78	39,8	30,5	99,2	35,7	40,1	9,6	24,1	1,084	4,1	20,9	0,578	0,00000
T128	73	45,0	31,0	121,1	39,4	46,4	12,0	26,7	1,405	4,1	22,8	0,636	0,00000
T133	9	27,7	11,1	39,4	21,1	34,9	10,0	36,1	3,339	-0,7	-0,9	0,910	0,31949

наглядное предварительное представление о неоднородности поля рассматриваемой переменной (рис. 3). На рис. 4 построены графики нормального и логнормального плотностей распределения значений модуля деформации по совокупным данным.

Анализ статистических данных в табл. 2 показывает, что интервал средних значений изменяется от 25,9 до 49,8 МПа. При этом показатель вариации генеральной совокупности по всем точкам зондирования (табл. 3) составляет $V = 29,852 \%$, т.е. данное значение не превышает регламентируемое ГОСТ 20522 пороговое значение в 30 %. Таким образом можно было бы сделать вывод об однородности значений модуля деформации E . Однако необходимо учитывать ряд существенных моментов. Показатели генеральных статистик — среднее значение m и стандартное отклонение σ , хоть и являются достоверными характеристиками, описывающими

ми отдельную (частную) совокупность, но они мало дают информации о генеральной пространственной совокупности, не отражают экстремумы значений пространственных данных, а также ничего не говорят о корреляционной структуре исследуемой переменной. Вообще, методология одномерной статистики едва ли подходит для описания пространственного распределения данных и пространственных закономерностей.

Так, в этом исследовании построенные пространственные модели значений E и V указывают на значительную вариативность статистических признаков (рис. 5, 6). Они позволяют получить значения генеральных статистик в любой точке исследуемого массива. Очевидно, что по характеру распределения значения среднего модуля деформации, проектирование отдельно расположенных, столбчатых фундаментов может привести к различным осадкам.

Табл. 3. Результат статистического анализа генеральной совокупности значений модуля деформации E Table 3. Statistical analysis results of combined distribution deformation modulus E values

Размер выборки, шт. / Sampling size, pcs	622
Среднее значение, МПа / Average value, MPa	38,690
Медиана / Median	38,326
Мода / Mode	различные / different
Минимальное значение, МПа / Minimal value, MPa	11,101
Максимальное значение, МПа / Maximal value, MPa	132,52
Нижний квартиль / Lower quartile	32,609
Верхний квартиль / Upper quartile	43,261
Интервал / Interval	121,425
Стандартное отклонение, МПа / Standard deviation, MPa	11,550
Стандартная ошибка среднего значения, % / Standard error of the average value, %	1,628
Коэффициент вариации, % / Coefficient of variation, %	29,852
Коэффициент асимметрии / Coefficient of asymmetry	2,73
Стандартная ошибка, % / Standard error, %	0,097
Коэффициент эксцесса / Coefficient of excess	13,060
Стандартная ошибка, % / Standard error, %	1,014
Показатель Колмогорова – Смирнова / Kolmogorov – Smirnov index	0,091
Показатель доверия p / Confidence index p	0,01

Рис. 5. Пространственная модель (на основе кригинга) модуля деформации E , МПаFig. 5. Spatial (kriging-based) model of deformation modulus E , MPa

Рис. 6. Пространственная модель коэффициента вариации (на основе кригинга) v , %

Fig. 6. Spatial (kriging-based) model of coefficient of variation v , %

Для геостатистического обоснования о возможности практического использования пространственных моделей данных в инженерных расчетах необходимо проверить гипотезы об однородности и изотропии массива данных. Если данные однородны (когда функции распределения случайной величины не изменяются при замене рассматриваемого сечения), то между ними должна наблюдаться корреляционная зависимость. Поэтому для окончательного подтверждения (или опровержения) гипотезы об однородности деформационных характеристик данных были построены корреляционные функции в виде экспериментальных вариограмм (рис. 7, 8) и автокорреляционных зависимостей (рис. 9, 10).

Постоянное значение вариограммы на рис. 7 и 8 при изменении длины лага показывает отсутствие корреляционной связи между значениями в парах. Это говорит о том, что при изменении длины вектора вариограммные значения остаются постоянными, а значит какая-либо взаимосвязь между точками отсутствует. Так, вариограмма указывает на высокую неоднородность массива данных и наличие экстремальных значений. По данным вариограммам не представляется возможным построение вариограммной модели. Для описания корреляционной структуры этого массива, судя по всему,

требуется повысить плотность наблюдений за счет сокращения расстояния между точками испытаний (зондирования) грунта.

Отсутствие корреляции данных показывает и автокорреляционная функция (рис. 9, 10).

Таким образом, получается, что:

- дальнейшее применение геостатистического анализа и пространственно-корреляционного моделирования, в данном случае, некорректно;
- построенные пространственные аппроксимирующие модели значений модуля деформации и коэффициента вариации (рис. 5, 6) на основе методики обычного кригинга недостоверны.

В качестве верификации выполненных расчетов была сделана оценка корреляционной функции для выражения связи значений исследуемой переменной E по глубине. Для этого была построена экспериментальная одномерная вариограмма по точке зондирования T107 (рис. 11). По этой вариограмме наблюдается положительная связь при несущественном изменении переменной. Очевидно, что наличие корреляции между значениями переменной имеется. Отсутствие ограниченности значений (порога) свидетельствует о не подтверждении гипотезы о стационарности, а также о возможном влиянии тренда.

Рис. 7. Экспериментальная вариограмма значений модуля деформации по данным статического зондирования

Fig. 7. Experimental variogram of deformation modulus values based on CPT tests

Рис. 8. Экспериментальная вариограмма по укрупненным данным (после статистической обработки)

Fig. 8. Combined experimental variogram of deformation modulus values based on CPT tests

Рис. 9. Автокорреляционная функция значений модуля деформации по результатам статического зондирования

Fig. 9. Autocorrelation function of deformation modulus values based on CPT tests

Рис. 10. По укрупненным данным (после статистической обработки)

Fig. 10. Combined autocorrelation function of deformation modulus values based on CPT tests

Рис. 11. Вариограмма по данным статического зондирования в точке T107

Fig. 11. Variogram of deformation modulus data acquired at CPT #107 test point

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

По результатам данного исследования можно сделать следующие выводы:

1. Геостатистическое оценивание пространственных данных для рассматриваемого участка возможно только после получения дополнительных сведений статического зондирования. При таком объеме инженерно-геологической информации анализ пространственной непрерывности возможен исключительно детерминистическими линейными методами интерполяции.

2. Параметр неоднородности грунта — коэффициент вариации, регламентируемый ГОСТ 20522, не

является достоверным параметром для объективного описания неоднородности пространственных данных, т.е. всего массива дисперсных грунтов и их свойств.

3. Регламентируемые требования ГОСТ 20522 относятся к статистическому анализу одномерных сведений и не отражают пространственную информацию и закономерности для выполнения геоэстатистического моделирования. С целью применения методологии геоэстатистики в проектах строительства зданий и сооружений программы работ инженерно-геологических изысканий должны учитывать требования, методы и способы пространственно-корреляционного моделирования геотехнических сред.

ЛИТЕРАТУРА

1. Fenton G.A., Griffith D.V. Risk assessment in geotechnical engineering. John Wiley & Sons, Inc. 2008. Pp. 91–103. DOI: 10.1002/9780470284704
2. Пшеничкин А.П. Основы вероятностно-статистической теории взаимодействия сооружений с неоднородными грунтовыми основаниями. Волгоград : ВолГАСУ, 2006. С. 9–63.
3. Болотин В.В. Применение методов теории вероятностей и теории надежности в расчетах сооружений. М. : Издательство литературы по строительству, 1971. С. 4–10.
4. Dubrule O. Geostatistics for seismic data integration in earth models. EAGE, 2003. Pp. 10–12. DOI: 10.1190/1.9781560801962
5. Isaaks E.H., Srivastava R.M. Applied geostatistics. NY : Oxford University Press, 1989. Pp. 41–64.
6. Griffiths D.V., Huang J., Fenton G.A. Modeling of stability and risk of geotechnical systems in highly variable soils // International conference on advances in geotechnical engineering. 2011.
7. Deutsch C.V., Journel A.G. Geostatistical software library and user's guide. Oxford university press, 1998. Pp. 9–10.
8. Brom A., Natonik A. Estimation of geotechnical parameters on the basis of geophysical methods and geostatistics // Contemporary trends in geoscience. 2017. Vol. 6. Issue 2. Pp. 70–79. DOI: 10.1515/ctg-2017-0006
9. Chiles J.-P., Delfiner P. Geostatistics. Modeling spatial uncertainty. Second Edition. John Wiley & Sons, 2012. Pp. 28–138.
10. Diggle P.J., Tawn J.A., Moeed R.A. Model-based geostatistics // Journal of the Royal Statistical Society: Series C (Applied Statistics). 2002. Vol. 47. Issue 3. Pp. 299–350. DOI: 10.1111/1467-9876.00113
11. Демьянов В.В., Савельева Е.А. Геостатистика, теория и практика / под. ред. Р.В. Арутюняна. М. : Наука, 2010. С. 16–37.
12. Etemadifar M., Vaziri N.S., Aghamolaie I., Moghaddas N.H., Lashkaripour G.R. Heterogeneity evaluation of soil engineering properties based on Kriging interpolation method. Case study: North East of Iran, West of Mashhad // Soils and Rocks. 2018. Vol. 41. Issue 2. Pp. 193–202. DOI: 10.28927/SR.412193
13. Chiasson P., Lafleur J., Soulie M., Law K.T. Characterizing spatial variability of a clay by geostatistics // Canadian Geotechnical Journal. 1995. Vol. 32. Issue 1. Pp. 1–10. DOI: 10.1139/t95-001
14. Marques J.P. Applied statistics using SPSS, Statistica, Matlab and R. Springer. Berlin : Heidelberg, 2007. Pp. 10–15. DOI: 10.1007/978-3-540-71972-4
15. Gülser C., Ekberli I., Candemir F. Spatial variability of soil physical properties in a cultivated field // Eurasian Journal of Soil Science (EJSS). 2016. Vol. 5. Issue 3. P. 192. DOI: 10.18393/ejss.2016.3.192-200
16. Gonnouni M.E., Riou Y., Hicher P.Y. Geostatistical method for analysing soil displacement from underground urban construction // Geotechnique. 2005. Vol. 55. Issue 2. Pp. 171–182. DOI: 10.1680/geot.2005.55.2.171
17. Зеркаль О.В., Фоменко И.К. Влияние различных факторов на результаты вероятностного анализа активизации оползневых процессов // Инженерная геология. 2016. № 1. С. 16–21.
18. Кургузов К.В., Фоменко И.К. Основополагающие математические модели грунтов в практике геотехнического моделирования // Естественные и технические науки. 2019. № 5. С. 240–247. DOI: 10.25633/ETN.2019.05.04
19. Мельников А.В., Болдырев Г.Г. Корреляционные уравнения оценки модуля деформации грунтов по результатам статического зондирования // Основания, фундаменты и механика грунтов. 2015. № 3. С. 2–7.

Поступила в редакцию 4 апреля 2019 г.

Принята в доработанном виде 11 июля 2019 г.

Одобрена для публикации 31 июля 2019 г.

ОБ АВТОРАХ: **Константин Владимирович Кургузов** — инженер-проектировщик; **Российский государственный геологоразведочный университет имени Серго Орджоникидзе (МГРИ)**; 117997, г. Москва, ул. Миклухо-Маклая, д. 23; kurgusov@yandex.ru;

Игорь Константинович Фоменко — доктор геолого-минералогических наук, профессор; **Российский государственный геологоразведочный университет имени Серго Орджоникидзе (МГРИ)**; 117997, г. Москва, ул. Миклухо-Маклая, д. 23; РИНЦ Author ID: 63706, Scopus Author ID: 56975492900, WoS Researcher ID: L-5467-2016, ORCID: 0000-0003-2318-6015; ifolga@ifolga.com.

REFERENCES

1. Fenton G.A., Griffith D.V. *Risk assessment in geotechnical engineering*. John Wiley & Sons, Inc. 2008; 91-103. DOI: 10.1002/9780470284704
2. Pshenichkin A.P. *Basics of probability-statistical theory of structure-soil interactions*. Volgograd, VolgASU Publ., 2006; 9-63. (rus.).
3. Bolotin V.V. *Application of probability theory and reliability theory in structural calculations*. Moscow, Building Literature Publishing House, 1971; 4-10. (rus.).
4. Dubrule O. *Geostatistics for seismic data integration in earth models*. EAGE, 2003; 10-12. DOI: 10.1190/1.9781560801962
5. Isaaks E.H., Srivastava R.M. *Applied geostatistics*. NY, Oxford University Press, 1989; 41-64.
6. Griffiths D.V., Huang J., Fenton G.A. Modeling of stability and risk of geotechnical systems in highly variable soils. *International conference on advances in geotechnical engineering*. 2011.
7. Deutsch C.V., Journel A.G. *Geostatistical software library and user's guide*. Oxford university press, 1998; 9-10.
8. Brom A., Natonik A. Estimation of geotechnical parameters on the basis of geophysical methods and geostatistics. *Contemporary Trends in Geoscience*. 2017; 6(2):70-79. DOI: 10.1515/ctg-2017-0006
9. Chiles J.-P., Delfiner P. *Geostatistics. Modeling spatial uncertainty*. Second Edition. John Wiley & Sons, 2012; 28-138.
10. Diggle P.J., Tawn J.A., Moyeed R.A. Model-based geostatistics. *Journal of the Royal Statistical Society: Series C (Applied Statistics)*. 2002; 47(3):299-350. DOI: 10.1111/1467-9876.00113
11. Demianov V.V., Savelieva E.A. *Geostatistics, theory and practice* / ed. R.V. Arutunayn. Moscow, Science Publ., 2010; 16-37. (rus.).
12. Etemadifar M., Vaziri N.S., Aghamolaie I., Moghaddas N.H., Lashkaripour G.R. Heterogeneity evaluation of soil engineering properties based on Kriging interpolation method. Case study: North East of Iran, West of Mashhad. *Soils and Rocks*. 2018; 41(2):193-202. DOI: 10.28927/SR.412193
13. Chiasson P., Lafleur J., Soulie M., Law K.T. Characterizing spatial variability of a clay by geostatistics. *Canadian Geotechnical Journal*. 1995; 32(1):1-10. DOI: 10.1139/t95-001
14. Marques J.P. *Applied statistics using SPSS, statistica, Matlab and R*. Springer, Berlin, Heidelberg, 2007; 10-15. DOI: 10.1007/978-3-540-71972-4
15. Gülser C., Ekberli I., Candemir F. Spatial variability of soil physical properties in a cultivated field. *Eurasian Journal of Soil Science (EJSS)*. 2016; 5(3):192. DOI: 10.18393/ejss.2016.3.192-200
16. Gonnouni M.E., Riou Y., Hicher P.Y. Geostatistical method for analysing soil displacement from underground urban construction. *Geotechnique*. 2005; 55(2):171-182. DOI: 10.1680/geot.2005.55.2.171
17. Zerkal O.V., Fomenko I.K. Influences of various factors on the results of probabilistic analysis of landslide activation. *Engineering Geology World*. 2016; 1:16-21. (rus.).
18. Kurguzov K.V., Fomenko I.K. Constitutive mathematical soil models in geotechnical practice. *Technical science*. 2019; 5:240-247. DOI: 10.25633/ETN.2019.05.04 (rus.).
19. Melnikov A.V., Boldirev G.G. Correlating equations for deformation modulus estimation based on CPT tests. *Soil Mechanics and Foundation Engineering*. 2015; 3:1-7. (rus.).

Received April 4, 2019.

Adopted in its final form on July 11, 2019.

Approved for publication July 31, 2019.

BIONOTES: Konstantin V. Kurguzov — structural engineer; **Sergo Ordzhonikidze Russian State University for Geological Prospecting (MGRI)**; 23 Mikluho-Maklay st., 117997, Moscow, Russian Federation; kurgusov@yandex.ru;

Igor K. Fomenko — Doctor of Geology and Mineralogy Science, Professor; **Sergo Ordzhonikidze Russian State University for Geological Prospecting (MGRI)**; 23 Mikluho-Maklay st., 117997, Moscow, Russian Federation; RISC Author ID: 63706, Scopus Author ID: 56975492900, WoS Researcher ID: L-5467-2016, ORCID: 0000-0003-2318-6015; ifolga@ifolga.com.