

DOI 10.53278/2306-9139-2023-2-21-13-28

УДК 624.131.4

**ИНЖЕНЕРНО-ГЕОЛОГИЧЕСКОЕ МОДЕЛИРОВАНИЕ
ПРОСТРАНСТВЕННОЙ НЕОДНОРОДНОСТИ ГРУНТОВ****ENGINEERING-GEOLOGICAL MODELING OF THE SPATIAL HETEROGENEITY
OF SOILS**© 2023 г. Г. С. Аманова¹, Е. А. Вознесенский²

© 2023 G. S. Amanova, E. A. Voznesensky

^{1,2}Институт геоэкологии им. Е. М. Сергеева (ИГЭ РАН), Уланский пер. д. 13 стр.2, Москва, 101000, Россия^{1,2}Sergeev Institute of Environmental Geoscience (IEG RAS), 13 bld 2 Ulansky lane, Moscow, 101000, Russia^{1,2}Геологический факультет МГУ им. М. В. Ломоносова, Ленинские горы д.1, Москва, 119234, Россия^{1,2}Faculty of Geology, Lomonosov Moscow State University, 1 Leninskie Gory, Moscow, 119234, Russia131597tupac@mail.ru¹, eugene@geoenv.ru²

Аннотация: В статье рассматривается проблема неоднородности свойств грунтов в массиве и возможные пути оценки закономерностей ее проявления с помощью трехмерного численного моделирования пространственных полей исследуемых показателей в рамках геостатистического подхода. Анализируются результаты такого моделирования на примере достаточно пестрого по составу и строению массива грунтов. Показано, что структура полей геологических параметров а) различается для разных геолого-генетических комплексов горных пород, б) может быть проще, чем субъективно выделяемая комбинация инженерно-геологических элементов, в) предложенный подход способен выявлять и объяснять присутствующие в любых геологических подразделениях разреза значимые отклонения от нормального или логнормального распределения в его верхнем и нижнем квартилях. Эти всплески в области максимальных и минимальных значений сами по себе — дополнительная характеристика неоднородности грунтов, они свидетельствуют о не случайности, типичности таких «выбросов», которые целесообразно учитывать, а не отбраковывать из-за малости выборок. Такой анализ неоднородности позволяет увидеть общую картину строения массива и особенно полезен при пестром строении и чередовании разновидностей грунтов, затрудняющих расчленение разреза. Он также позволяет получить дополнительную полезную информацию и о потенциальной возможности развития в них неблагоприятных геологических процессов, например, выявить в разрезе массива суффозионно-неустойчивые разности песков.

Synopsis: The article discusses the problem of soil properties heterogeneity in the massif and possible ways of estimating the regularities of its manifestation by means of three-dimensional numerical modeling of spatial fields of the studied parameters within the framework of geostatistical approach are considered. The results of such modeling are analyzed on the example of a fairly diverse in composition and structure soil massif. It is demonstrated that the structure of geological parameter fields a) differs for different stratigraphic-genetic complexes of soils and rocks, b) can be simpler than the combination of engineering-geological units, c) the proposed approach is able to identify and explain significant deviations from the normal or lognormal distribution in its upper and lower quartiles, present practically in any geological subdivisions of the section. These outbursts in the maximum and minimum ranges are themselves an additional characteristic of soil heterogeneity; they testify to the non-randomness of such “outbursts”, their typicality, which should be taken into account, but they are usually rejected in standard statistical processing due to the smallness of data samples. Such analysis of heterogeneity allows us to see the general picture of the structure of the massif or its part and can be especially useful in case of mottled structure and frequent alternation of soil varieties, which complicates detailed division of the profile. It also provides additional useful information about the potential for the development of unfavorable geological processes in them, for example, to identify suffusion-unstable sand varieties in the massif profile.

Ключевые слова: неоднородность, изменчивость, грунты, массив, геостатистика, поле показателя, трехмерное моделирование, инженерно-геологическая модель

Keywords: heterogeneity, variability, soils, massif, geostatistics, parameter field, 3D modelling, engineering geological model

1. Введение

Неоднородность состава и свойств грунтов является их неотъемлемым качеством на любом уровне изучения — от маленького лабораторного образца до массива. Неоднородность понимается авторами как различие какой-либо рассматриваемой характеристики грунта в двух разных точках пространства. Следовательно, для исчерпывающего описания любого свойства грунта соответствующие количественные или качественные показатели должны быть определены для каждой точки исследуемого массива. Эта задача на современном уровне развития науки в общем виде неразрешима, что порождает в инженерной геологии проблему пространственной неоднородности грунтов, преодоление которой возможно лишь через познание природы и закономерностей проявления этой неоднородности для отдельных характеристик грунтов.

В настоящее время в практической области инженерно-строительной деятельности эта проблема обходится путем упрощения реальной ситуации — заменой непрерывно пространственно-неоднородной среды ее кусочно-однородной моделью, состоящей из набора инженерно-геологических элементов (далее ИГЭ), все показатели свойств которых принимаются постоянными в их границах, причем на основании статистической обработки смехотворно малых по своему объему выборки фактических данных. Этот подход был разработан в 60-х годах прошлого века для возможностей ручного счета и, по существу, до сих пор не поменялся. Сами границы ИГЭ также проводятся субъективно либо геологом, либо — еще более упрощенно — специализированной программой по данным, заложенным тем же геологом, что не меняет ситуацию принципиально. Таким образом, в межскважинном пространстве положение границ ИГЭ остается неопределенным.

При этом многие из выделяемых границ этих самых ИГЭ отнюдь не являются однозначными и четкими в геологическом пространстве — напротив, часто это границы диффузные по своей природе, означающие постепенные изменения какого-либо качества грунта, и только наша субъективная схема деления массива на ИГЭ делает их некими однозначными линиями на разрезе или карте. Между тем, современный методический и математический уровень геологического и инже-

нерно-геологического численного моделирования уже может предоставить достаточно продвинутые инструменты для изучения самой пространственной неоднородности грунтов, что позволяет приступить к поискам решения этой актуальной задачи инженерной геологии.

Описание свойств геологических тел, как отмечал Г. К. Бондарик [1], реализуемо, если имеется информация о признаках (или параметрах), отражающих эти свойства, полученные для некоторого числа точек рассматриваемого тела, распределенных более или менее равномерно по его объему. Пространственная структура свойства геологического тела базируется на понятии поля геологического параметра — количественной меры любого качества или набора качеств какого угодно компонента литосферы (ее части — геологического тела), отражающего вероятность или меру отношений качеств, характеризующих структуру геологического тела, который является или результатом непосредственного измерения свойств литосферы, или итогом некоторой процедуры преобразования численной или не численной информации.

Геологическая история каждого конкретного массива грунтов настолько своеобразна, а значение различных этапов этой истории в формировании физических свойств грунтов обычно настолько плохо известно, что рассмотреть эту проблему «в целом» чрезвычайно трудно. Все стадии петрогенеза, представляют собой характерную реакцию грунтов как системы на изменение внешних условий (давления, температуры, химизма вмещающей породы) и включают процессы физико-химического и механического уравнивания многокомпонентной системы грунтов в постоянно меняющихся внешних условиях. Любое изменение условий существования грунтов так или иначе сказывается на их составе и строении.

Неоднородность грунтов является важным фактором, который необходимо учитывать не только при проведении изысканий и изучении их свойств, но и при расчете естественных оснований проектируемых инженерных сооружений. При этом на работу естественного основания могут оказать существенное воздействие такие элементы неоднородности, которые находятся в определенных масштабных соотношениях с размерами этого основания. Влияние неоднородности зависит не только

от соотношения размеров области воздействия и величины сооружения, но и от напряженного состояния массивов грунтов, типа и конструкции сооружения и ряда других факторов.

Под изменчивостью состава и свойств грунтов, вслед за И. С. Комаровым [4], авторами здесь понимается их пространственная неоднородность, которая может быть сведена к одному из трёх типов: скачкообразной незакономерной, скачкообразной закономерной и функциональной изменчивости (рис. 1). Г. К. Бондарик на основании вероятностной природы характеристик состава и свойств грунтов для выделенных Н.В. Коломенским типов изменчивости предлагал использовать термины, применяемые в теории случайных функций. Так, скачкообразную незакономерную изменчивость он называл стационарной, скачкообразную закономерную изменчивость — нестационарной, а функциональную изменчивость — квазифункциональной.

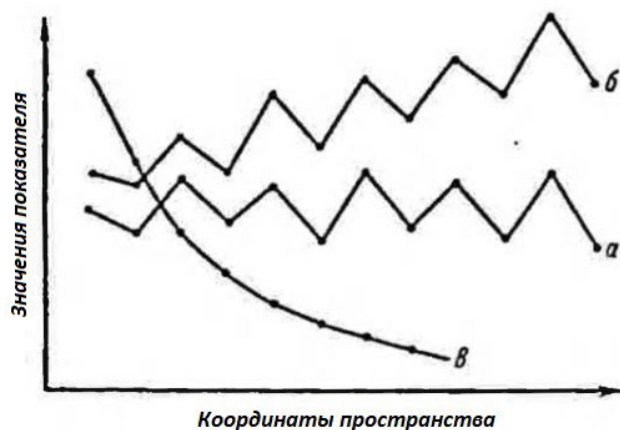


Рис. 1. Графики, иллюстрирующие типы инженерно-геологической изменчивости горных пород: а — скачкообразная незакономерная; б — скачкообразная закономерная; в — функциональная (по [5])

Под скачкообразной незакономерной изменчивостью (стационарная или изменчивость по правилу «пилы» у Н. В. Коломенского) понимают такой ее тип, при котором не наблюдается закономерной связи показателя с параметрами пространства. Такой тип изменчивости свойств наблюдается даже во внешне однородных слоях грунтов, значения показателей которых изменяются от точки к точке незакономерно, случайно (рис. 2а).

При скачкообразной закономерной изменчивости (нестационарной) наблюдается закономерная связь с параметрами пространства в виде общего тренда, которая зависит от глубины залегания или простираения грунтов (рис. 2б). Данный тип изменчивости Н.В. Коломенский [5] подразделяет на региональный и временный, зависящие от координат

пространства и обусловленные геологическими факторами. Указанное подразделение изменчивости основано на допущении, что она может быть разделена на низкочастотную составляющую — плавные колебания, связанные с координатами пространства, и высокочастотную — крайне нерегулярные изменения, носящие случайный характер и не зависящие от координат пространства.

Роль случайного компонента в изменчивости грунтов, как отмечает И.С. Комаров [4], сложилась, с одной стороны, в связи с применением в современной практике дискретной «точечной» системы опробования, а с другой — в связи с тем, что практически невозможно осуществить отбор

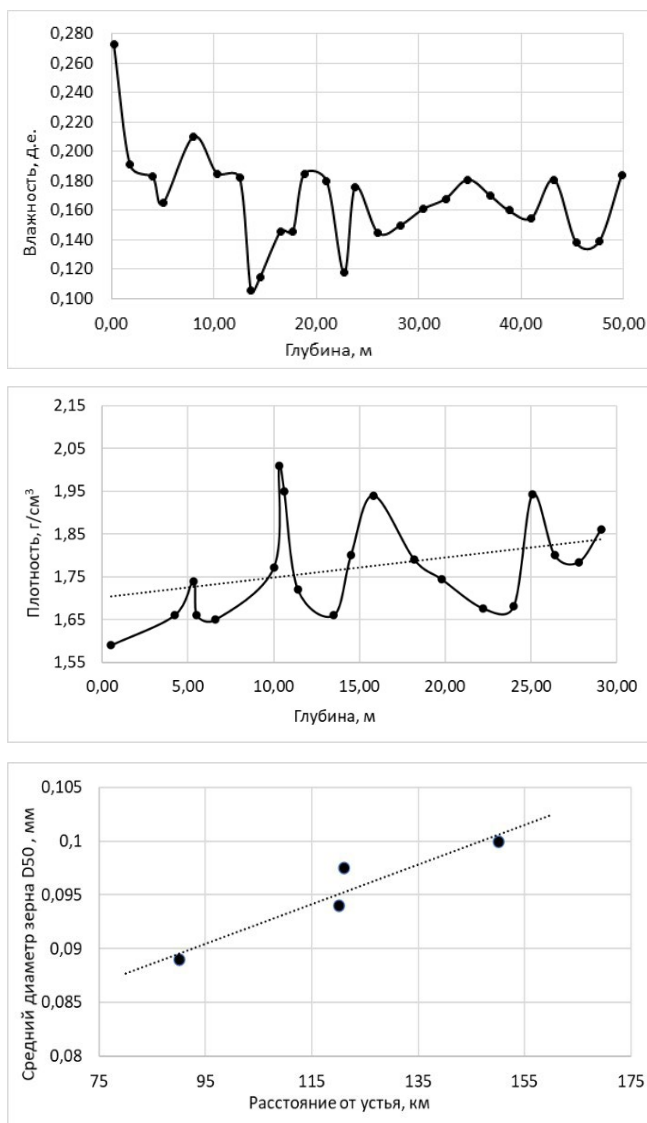


Рис. 2. Примеры разных типов инженерно-геологической изменчивости грунтов: а — скачкообразная незакономерная изменчивость влажности грунтов с глубиной; б — скачкообразная закономерная изменчивость плотности грунтов с глубиной; в — квазифункциональная изменчивость среднего размера частиц аллювия по продольному профилю реки (Б. Салым, Западная Сибирь)

образцов из одного элементарного стратиграфического слоя. При использовании точечной системы опробования и лабораторных методов изучения свойств грунтов на отдельных образцах, кажущаяся изменчивость, т. е. та картина изменчивости, которую восстанавливает исследователь с помощью выполняемого опробования, зависит не только от реальных свойств грунтов, но и в большей степени от таких факторов, как принятая величина шага опробования, число взятых образцов, их геометрия, точность лабораторных исследований и другие, и может существенно отличаться от истинной изменчивости, которой характеризуется порода.

Наряду с такой псевдослучайной изменчивостью, грунты обладают собственно случайной изменчивостью, природа которого связана с такими явлениями, как слоистость, трещиноватость, наличие зон разломов, дробления и других вариантов неоднородностей, где происходит скачкообразное изменение свойств грунтов, следовательно, и разрывы функций, описывающих закономерную пространственную изменчивость).

Наконец, возможна функциональная (квазифункциональная) изменчивость показателей свойств грунтов (рис. 2в). Согласно В. Д. Ломтадзе [6], данный тип характеризуется таким изменением свойств грунтов от точки к точке, при котором средние значения показателей располагаются по кривой, т. е. зависят от координат пространства и подчиняются более сложному закону. Это, по сути дела, нестационарный режим изменчивости с небольшим рассеянием частных значений показателя и математическим ожиданием, функционально зависящим от аргумента. Такой тип изменчивости характерен, например, для искусственно увлажненных лессовых грунтов или грунтов, подвергшихся преобразованию методами технической мелиорации.

Определение типа изменчивости показателей проводится исходя из теории случайных функций, которыми описываются распределения геологических параметров, вследствие чего изучение изменчивости осуществляется на основе следующих статистических характеристик: математического ожидания показателя, дисперсии и автокорреляционной функции. Основные законы распределения исследуемых параметров, в большинстве случаев близки к нормальному или логнормальному распределению.

Вопросы неоднородности и изменчивости свойств грунтов в связи с решением как теоретических, так и различных практических задач рассматривались также в работах зарубежных исследователей [7, 11]. На основании анализа опу-

бликованных научных работ по изучению неоднородности и изменчивости грунтов в массивах и возможностей, имеющихся в настоящее время программных средств для их пространственной оценки, можно выделить следующие основные содержательные задачи трехмерного инженерно-геологического моделирования полей изменения показателей состава и свойств грунтов (или «полей геологических параметров» — по И. С. Комарову) в массивах.

1. Анализ внутренней пространственной неоднородности слагающих массив геологических тел или их частей, в пределах которых каждый из рассматриваемых показателей можно считать случайной величиной. Таким образом может быть изучен характер изменчивости не только грунтов, разных в генетико-возрастном отношении, но и вскрыта внутренняя неоднородность условно однородных частей массива, в том числе и ИГЭ, выделяемых в исследуемом массиве в соответствии с нормативными документами.

2. Выявление в пределах выделенных ИГЭ или даже расчетных геологических элементов зон, характеризующихся наибольшими отклонениями значений поля показателя от расчетных величин, принятых в пределах нормативно допустимых вариаций. Такой дополнительный анализ для ответственных сооружений позволит скорректировать распределение нагрузок и/или посадку фундамента для снижения неравномерных осадок, крена и, следовательно, повысить безопасность сооружения.

3. Изучение градиентов изменения полей показателей состава и свойств, направленное на выявление их детерминированного компонента, обусловленного общей и закономерной направленностью процессов осадконакопления, лито- и эпигенеза. Такой анализ может также подтвердить или опровергнуть обоснованность границ между выделенными ИГЭ, что будет способствовать уточнению инженерно-геологической модели оснований.

Что же реально требуется сделать в инженерной геологии и геотехнике, чтобы корректно оценить пространственную неоднородность грунтов для обеспечения ее учета в явном виде в целях обеспечения безопасности проектируемых сооружений? Для решения этой задачи представляется логичным следующий принципиальный порядок действий.

Шаг 1. Необходима оценка изменчивости грунтов путем построения полей каждого исследуемого геологического параметра. Это информационное поле затем может анализироваться в 2D или 3D представлении для каждого показателя состава и свойств грунтов, используемого при анализе.

Шаг 2. Включение этих полей параметров в геологическую модель рассматриваемого мас-

сива с использованием специализированного программного обеспечения позволит получить новый тип инженерно-геологической модели, в явном виде отражающей грунтовые условия, включая их непрерывную неоднородность, вместо комбинации «кирпичиков» — ИГЭ, которые полагаются однородными, но таковыми не являются.

Шаг 3. Сопряжение такой инженерно-геологической модели с моделью (механической, термической, гидравлической, др.) сооружения или его фундамента будет означать возникновение и нового типа геотехнической модели основания сооружения — с непрерывным описанием вариаций ключевых параметров вместо конечных или граничных элементов с прерывистым изменением соответствующих показателей на их границах.

В данной статье рассматриваются вопросы, связанные с первыми двумя блоками задач, поскольку третий блок — сама возможность такого сопряжения — определяется разработкой программных средств, отличных от использующихся в настоящее время для этих целей преимущественно конечно-элементных решений.

2. Методика инженерно-геологического моделирования массива грунтов

2.1. Общий подход к моделированию неоднородности грунтов

Основным подходом к оценке изменчивости свойств грунтов в массивах сегодня являются методы математической статистики, которые ещё в 50-х годах прошлого столетия нашли свое применение в геологии. Первые работы в этом направлении принадлежат Б. П. Попову, широко использовавшему статистические методы при оценке условий строительства различных инженерных сооружений. Позднее вероятностно-статистические методы легли в основу метода установления гарантированных значений расчетных показателей, разработанного Н. Н. Масловым совместно с З.В. Пильгуновой [4]. Примерно в это же время был опубликован ряд работ Н. В. Коломенского и И.С. Комарова, в которых вопросы применения вероятностно-статистических методов в инженерной геологии нашли уже более полное, систематическое изложение. В 1959 г. в докладе Н. В. Коломенского и И. С. Комарова на XIII Геологическом конгрессе в Мехико была изложена общая схема применения вероятностно-статистических методов при изучении естественных оснований крупных инженерных сооружений, сохранившаяся без больших изменений до настоящего времени. Схема предусматривала использование модели случайной

величины и расчленение толщ пород на ИГЭ — условно однородные части массива горных пород, к которым такая модель может быть применена. Авторы старались показать, что методы математической статистики позволяют провести объективную и единообразную обработку материалов, а также дать оценку полученным результатам.

Среди существующих методов инженерно-геологической оценки массивов грунтов авторами были изучены естественно-статистические и статистические методы, поскольку именно методы математической статистики могут обеспечить наиболее надежную оценку неоднородности грунтов. Идея естественно-статистического метода заключается в том, что в природной среде геологические процессы стремятся прийти в равновесие с окружающими условиями, но этот процесс длится до тех пор, пока какие-либо естественные или искусственные причины не изменят эти условия. Естественно-статистический метод применим в различной геологической обстановке и для получения любых инженерно-геологических параметров, характеризующих инженерно-геологические условия, но требует массового количества данных.

Статистический метод оценки является наиболее точным и совершенным, но для его применения требуется детальное расчленение разреза и выполнение значительного объема горно-буровых работ, лабораторных и полевых определений показателей свойств грунтов. При этом следует придерживаться общего правила: обрабатываемый эмпирический материал должен относиться к качественно однородным геологическим объектам (горным породам), имеется в виду не вся толща в целом, а отдельные ее части — пласты, линзы или геологические тела иной формы. Это требование должно соблюдаться достаточно строго, так как средние значения, вычисленные для пород, искусственно объединенных в одну группу, лишены смысла и не могут быть использованы для каких-либо инженерно-геологических обобщений и заключений. Критерий однородности вводится в рассмотрение самим исследователем и во многом зависит от детальности исследований.

Методы математической статистики позволяют давать не только достаточно точную оценку, но при этом появляется возможность обрабатывать и анализировать огромные объемы данных. Анализ изменчивости свойств грунтов может выявить в пределах их массивов особенности изменения полей разных показателей в одних и тех же местах, то есть аналогичны ли они или претерпевают скачкообразные изменения, что будет говорить о характере взаимосвязи показателей этих свойств

и, тем самым, даст возможность более обоснованно судить о закономерностях их поведения в массиве. По этой причине при решении задачи о неоднородности полей показателей свойств грунтов в пределах выбранного объекта исследований и разработке его трехмерной инженерно-геологической модели авторы опирались на естественно-статистический подход, стремясь при этом исключить заведомое упрощение структуры этих полей и акцентируя внимание на ее изменениях, связанных с переходами на геологических и литологических границах.

2.2. Доступные инструменты моделирования

В настоящее время существует различное программное обеспечение (ПО) для численного моделирования массивов грунтов. Многие из них, такие как Midas, T-Navigator, Geotek Field, PLAXIS, Leapfrog Geo, основаны на методе конечных элементов и представляют собой пакеты вычислительных программ для расчёта напряжённо-деформированного состояния сооружений, фундаментов и оснований, используемые для решения задач инженерной геологии, геотехники и проектирования. Они в разной степени пригодны для построения полей изменения показателей в массиве и требуют развития в этом отношении.

Программная среда «Geotek Field», разработанная компанией НПП «ГЕОТЕК», является сегодня одним из наиболее приспособленных продуктов на российском рынке для решения вопросов, связанных с пространственной неоднородностью свойств грунтов, и в значительной мере направлена именно на такие задачи. Она позволяет проводить интерполяционные операции на основе аппроксимации Шепарда, триангуляции с линейной интерполяцией, а также метода кригинга. Однако пока это ПО имеет ряд ограничений и требует определенной доработки, поскольку интерполяция не осуществляется корректно при большом (более 50 м) расстоянии между выработками или при неоднородном распределении выборки, что воспринимается как недостаточность материала для интерпретации. Помимо этого, имеются ограничения, связанные с невозможностью задания малой глубины исследования и масштабирования полученной визуализации модели, в результате которого получается дополнительное искажение картины поля.

Наилучшим образом реализовать оценку пространственной неоднородности свойств грунтов оказалось возможным на программной платформе Petrel, разработанной компанией Schlumberger, которая широко используется в нефтегазовой геологии и при нефедобыче. Это ПО позволяет выполнять корреляцию пластов по скважинным данным,

интерпретировать данные сейсморазведки, строить модели коллекторов, визуализировать результаты моделирования коллекторов, рассчитывать объемы, проводить анализ данных (построение вариограмм, гистограмм), а также включает в себя модули литолого-фациального и петрофизического моделирования. С его помощью можно проводить подсчет запасов, создавать карты и разрабатывать стратегии разработки для максимально полной эксплуатации коллектора. Таким образом, не будучи специализированным инженерно-геологическим или геотехническим ПО, Petrel ориентирован на задачу выявления геологической неоднородности среды и оценку неоднородностей, вызванных изменчивостью свойств подземных резервуаров. Это важная отличительная особенность данного ПО, что и позволило использовать его для решения поставленных нами задач. Кроме того, это уже хорошо апробированное большим количеством пользователей-геологов программное обеспечение.

2.3. Основные этапы создания инженерно-геологической модели

Разработка программного комплекса Petrel seismic-to-simulation началась в 1996 году, в результате был получен интегрированный инструмент, позволяющий работать специалистам геологам и геофизикам сообща и предоставляющий нефтегазовым компаниям возможность находить креативные решения в области гидродинамического моделирования [3]. Данный программный пакет, работающий с набором неких случайных данных, может быть, по мнению авторов, с успехом использован и в инженерной геологии, в том числе для решения задачи изучения пространственной неоднородности массива грунтов.

Весь процесс построения трехмерной инженерно-геологической модели можно подразделить на несколько этапов.

Первый этап моделирования достаточно банален. Он заключается в импорте исходных данных, корреляции слоев по скважинам, создании поверхностей и трехмерной решетки. Цель ее построения — создание пространственной сетки, которая будет использована как основа для создания 3D ячеек с рассматриваемыми параметрами. Шаг сетки составляет 1 м, что позволяет достаточно подробно представить модель рассматриваемого массива грунтов.

Второй этап включает в себя детализацию полученного каркаса и упрощение инженерно-геологической ситуации исследуемой территории. Часто в результате изысканий по всей толще в разрезе может быть выделено n -ое количество ИГЭ, кото-

рые по свойствам существенно не различаются, что ставит под вопрос целесообразность выделения такого количества элементов. В связи с этим авторы задаются следующим вопросом: есть ли смысл усложнения лишь на первый взгляд кажущейся неоднородной толщи?

Завершающий шаг в построении структурного каркаса — это задание мощности и ориентировки слоев между горизонтами трехмерной сетки. Слои должны задаваться на основе показателей моделируемых свойств. При этом разбиение на слои только увеличивает разрешение сетки, для этого процесса не используются никакие дополнительные входные данные.

Создав каркас модели, можно приступать к моделированию полей рассматриваемых показателей свойств грунтов. Однако этапу моделирования предшествуют операция перемасштабирования данных, для которых используются анализируемые авторами показатели свойств грунтов и вариограммный анализ.

Перемасштабирование — это процесс преобразования, а именно усреднения, данных по скважинам для использования их в процессе моделирования свойств, поскольку размер ячейки трехмерного грида больше, тогда как самой ячейке грида можно присвоить только одно значение. Перемасштаби-

рованные значения становятся свойством трехмерного грида и не изменяются при любых процессах моделирования. При перемасштабировании изменяются только свойства ячеек, через которые проходит траектория скважины, значения в остальных ячейках остаются неизменными.

Важным свойством пространственно распределенных данных является их непрерывность, которая означает, что близко расположенные в пространстве измерения скорее всего будут иметь близкие значения. Пространственная непрерывность данных обычно описывается с помощью корреляционных и ковариационных функций, а именно построением вариограммы. Если говорить простыми словами, то вариограмма характеризует степень различия данных в зависимости от расстояния между ними, и может быть представлена графиком зависимости дисперсии от расстояния (рис. 3). Чем ближе значения данных (меньше разница между ними), тем больше значение вариограммы.

Для оценки вариабельности пространственной функции, в том числе в ПО Petrel, используют методы стохастического моделирования, которые позволяют получить множество реализаций значений функции в точке оценивания для заданного набора данных и выбранных параметров модели [10]. При этом каждая реализация обладает опре-

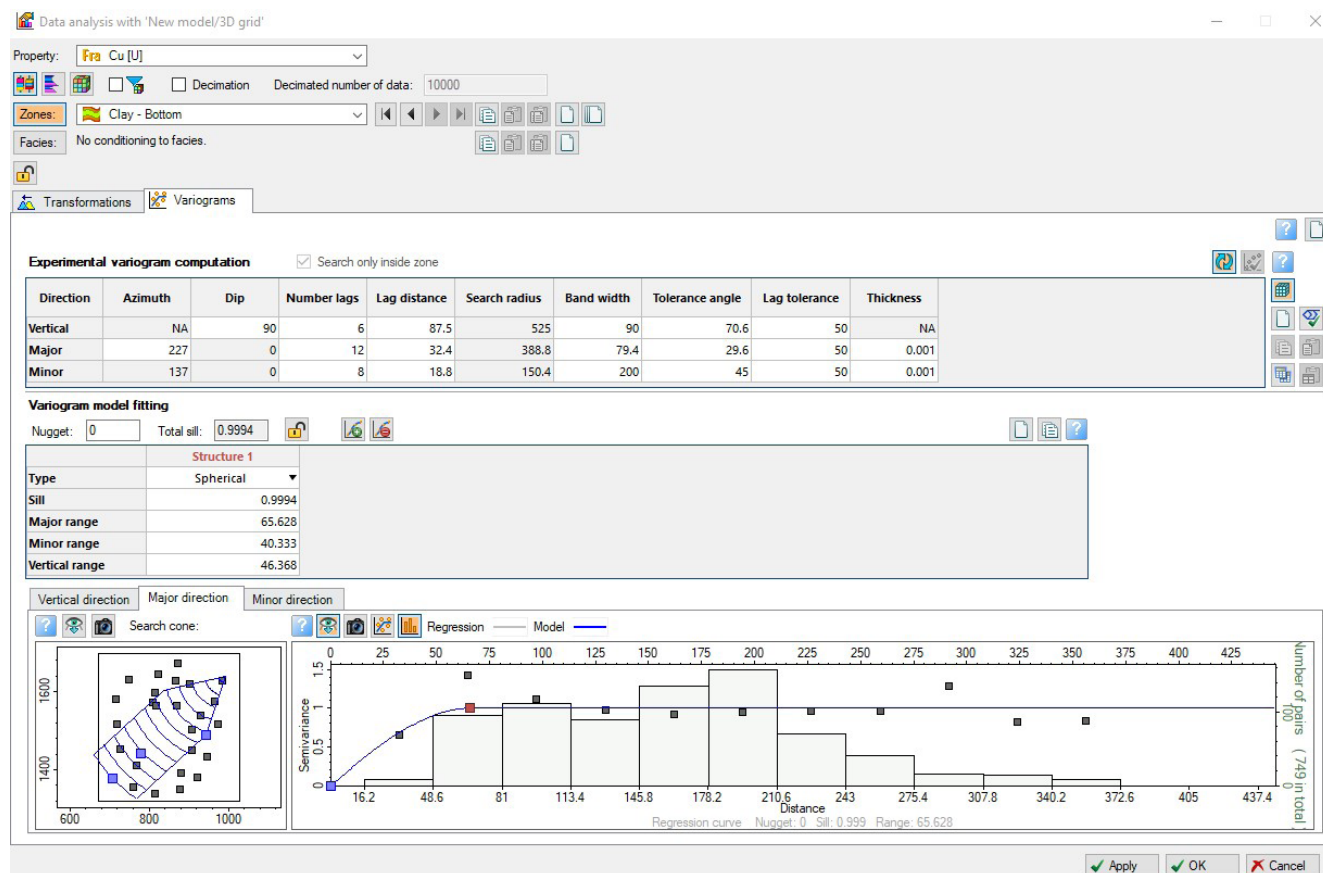


Рис. 3. Фрагмент окна вариограммного анализа в Petrel и график зависимости дисперсии от расстояния

деленными свойствами (в том числе и вариабельностью) исходного процесса, т.е. любая реализация является возможной моделью исходных данных. Таким образом, стохастическое моделирование позволяет оценивать пространственную неопределенность процесса.

Существуют различные подходы к стохастическому пространственному моделированию [9]. Один из них основан на принципе последовательного моделирования, который и использовался авторами в данной работе. Основой такого последовательного подхода является возможность перейти от совместной условной функции распределения к произведению локальных условных функций.

Последовательное Гауссово моделирование (sequential Gaussian simulation) воспроизводит непрерывные переменные. Метод последовательного стохастического Гауссова моделирования предполагает совместное нормальное распределение моделируемой случайной величины в исследуемой области, которое описывает распределение вероятностей нескольких случайных величин и является естественным продолжением одной случайной величины. Совместное нормальное распределение называется мультинормальным и предполагает распределение всех компонент (во всех точках) по стандартному нормальному закону. В этом случае для любой точки области локальная функция будет распределена по нормальному закону и определена двумя параметрами — средним значением и вариацией [3].

Основным преимуществом метода последовательного Гауссова моделирования является его простота, основанная на хорошо известном и понятном поведении нормального распределения, который позволяет получить реализации переменной, принимающей непрерывные значения, например, концентрации загрязнения или пористости породы. Для использования метода не имеют значения размеры области пространства. Таким образом, для построения и изучения пространственной неоднородности массива грунтов такие показатели их физических и физико-механических свойств, как плотность грунта, модуль деформации и угол внутреннего трения, а также суффозионная устойчивость грунтов, были проанализированы авторами методом последовательного Гауссова моделирования.

3. Инженерно-геологическая характеристика моделируемого массива

Количественный пространственный анализ неоднородности массивов грунтов на значительных площадях весьма затруднен не столько вычислительными возможностями и громоздкостью такой

задачи, сколько необходимостью большого объема однородных и относительно равномерно распределенных данных. Поэтому на сегодняшний день решение перечисленных задач представляется целесообразным для оснований крупных и ответственных сооружений, проектирование которых требует привлечения значительных объемов инженерно-геологической информации.

Рассмотрим некоторые возможности предлагаемого нами подхода на примере массива грунтов основания одного из таких сооружений. В строении этого массива до глубины 35 м участвуют в основном дисперсные четвертичные (преимущественно ледниковые и водно-ледниковые) грунты: суглинки, глины и кварц-полевошпатовые пески с включениями гравия, гальки — и кембрийские: песчаники, глины. В разрезе прослеживается также погребенная ложбина, которая связана с довалдайским ярусом палеорельефа и заполнена более молодыми осадками.

В результате анализа собранных при инженерных изысканиях данных в разрезе массива было выделено около 40 инженерно-геологических элементов. По описанию многие из них весьма близки между собой и, очевидно, формируют единые геологические тела, но отличаются некоторыми особенностями (например, вариациями крупности песков), которые, собственно, и являются отражением внутренней неоднородности этих тел. В результате на разрезе, фрагмент которого, построенный по данным 25 скважин, приведен на рисунке 4 появляется большое количество линзовидных тел небольшой мощности без контрастно различающихся свойств, выделенных на основании отличий какого-то одного показателя, полевого описания либо текстурных особенностей, что приводит к появлению множества субъективно проведенных на разрезе границ (линзы ведь надо как-то замыкать), поскольку фациальные размытые границы также становятся при расчете границами ИГЭ, что только усложняет инженерно-геологическую модель.

На первом этапе для целей моделирования и для исключения возможных погрешностей, связанных с нарушением случайного характера распределения геологических параметров, описанная выше толща может быть предварительно разбита на три разные зоны:

I зона — зона развития четвертичных песчано-глинистых отложений ледникового и флювиогляциального генезиса;

II зона — зона песчаников нижнего кембрия;

III зона — зона развития нижнекембрийских глин.

Кроме того, влияние на структуру поля ряда показателей свойств грунтов будут оказывать условия обводнения массива. В гидрогеологическом отношении на этой территории выделяются водоносные комплексы, приуроченные как к четвертичным отложениям, так и к дочетвертичным породам. Все генетические разности четвертичных отложений в различной степени обводнены и представляют собой водоносные комплексы и горизонты. Уровень грунтовых вод на данном участке практически совпадает с дневной поверхностью, следовательно, все рассматриваемые грунты находятся в массиве в водонасыщенном состоянии, и все анализируемые далее показатели определены в водонасыщенном состоянии. Многолетнемерзлые грунты отсутствуют.

Участок размещения проектируемого объекта изучен весьма подробно, в его пределах на разных стадиях изысканий пройдено большое количество инженерно-геологических скважин (порядка 1500 штук), точек статического зондирования, выполнен большой объем лабораторных исследований грунтов.

Все это обеспечивает значительный размер выборок фактических данных по любому из исследуемых параметров, причем эти данные распределены достаточно равномерно в объеме рассматриваемого массива.

При дальнейшем анализе следует иметь в виду, что структура пространственной неоднородности инженерно-геологических параметров массива грунта может, в том числе и одновременно, контролироваться несколькими факторами, в зависимости от типа рассматриваемого параметра. Изменчивость параметров первого типа контролируется как литологической неоднородностью, так и преобладающим типом контактов между частицами грунта. К таким параметрам можно отнести коэффициент фильтрации, пористость, модуль деформации, сцепление и т.д. В таком случае поле неоднородности содержит контрастные границы, которые ассоциируются с расположением в пространстве тех или иных литологических разностей.

Изменчивость параметров второго типа может контролироваться какими-либо трендами. Например, изменение влажности (водонасыщенности с глубиной) в первую очередь определяется глубиной залегания УГВ и высотой капиллярного поднятия. В таком случае поле неоднородности имеет плавные градации изменения параметров, т.е. контрастные границы отсутствуют. Но в данном случае все грунты насыщены водой, и этот фактор не будет менять структуру поля показателя.

Изменчивость третьих параметров не коррелирует ни с одним из известных признаков. В таком

Инженерно-геологический разрез по линии III—III

Масштаб:
Горизонтальный 1:1000
Вертикальный 1:100
Геологический 1:100

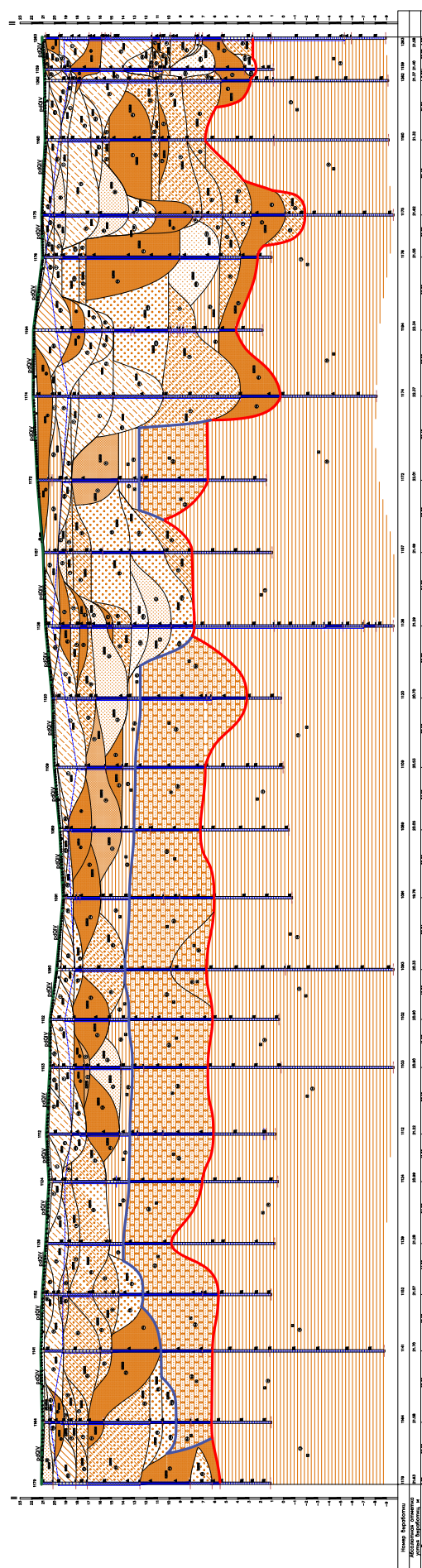


Рис. 4. Фрагмент инженерно-геологического разреза рассматриваемого участка.

случае поле неоднородности принимает случайное (в установленном диапазоне) распределение параметров в пространстве. К таким параметрам могут относиться, например, характеристики трещиноватости или закарстованности массива.

Применительно к рассматриваемому объекту анализировались поля показателей только первых двух типов.

4. Анализ результатов пространственного моделирования неоднородности массива грунтов

4.1. Типизация грунтов верхней части разреза

При анализе полей инженерно-геологических показателей грунтов, в том числе и физико-механических свойств, для верхней зоны разреза до глубины 10–12 м авторами использовались характеристики, рассчитанные по данным статического зондирования. Преимущество статического зондирования заключается в возможности расчета целого ряда необходимых показателей в массовом количестве на основе общепринятых и хорошо зарекомендовавших себя в практике изысканий корреляционных соотношений, что позволяет получить более достоверную структуру полей исследуемых показателей, чем по данным из отдельных точек пробоотбора. Эта верхняя зона рассматриваемого массива имеет наиболее пестрый состав и представлена чередованием четвертичных песчано-глинистых отложений ледникового и водно-ледникового генезиса (рис. 4).

Выделение разновидностей грунтов по гранулометрическому составу проводилось на основе так называемого фрикционного отношения по [2] — соотношения сопротивления грунта под наконечником зонда II типа и трения на участке его боковой поверхности:

$$R_f = f_s / q_c,$$

где f_s — удельное трение на участке боковой поверхности зонда, q_c — измеренное удельное сопротивление под наконечником зонда, соответственно.

Сопоставление между собой фрагмента верхней части инженерно-геологического разреза, представленного выше на рисунке 4, и распределения гранулометрических разновидностей грунтов по структуре фрикционного отношения грунта (рис. 5) показывает следующее:

- разрез верхней зоны преимущественно песчано-супесчаный с отдельными «пятнами» суглинков и глин, в целом, существенно менее глинистый и более однообразный, чем изображено на инженерно-геологическом разрезе;

- в построенном поле показателя R_f действительно просматриваются некие прерывистые, условно линзовидные тела, границы которых, однако, даже не напоминают нарисованные на разрезе произвольные контуры ИГЭ, вообще не выделяющиеся в большинстве случаев убедительно;
- эти тела имеют между собой неотчетливые и очень неровные «диффузные» границы, указывающие на часто случайный характер смены преобладающей дисперсности грунтов по глубине и постепенный, но обычно закономерный — по латерали.

Таким образом, при ближайшем рассмотрении разреза с помощью моделирования на основе методов геостатистики, строение верхней части грунтового основания оказывается заметно более простым, чем следует из ручной произвольной рисовки многочисленных мелких линзовидных ИГЭ, которые просто придуманы для согласования имеющихся в недостаточном количестве фактических данных с вариациями, наблюдаемыми по отдельным скважинам. Таким образом, на полученном разрезе каждая отдельная скважина вскрывает набор каждый раз разных мелких ИГЭ, часто не соединяющихся между собой. При этом поле рассмотренного показателя, трансформированное в поле распределения гранулометрических разностей водонасыщенных грунтов, получено в общем-то по тому же набору исходных данных, что и набор многочисленных ИГЭ (а их в этой части разреза нарисовано 22 шт.), но проанализированных в их общей совокупности, а не по 6–10 показателям на элемент.

Такой анализ позволяет увидеть общую картину строения массива или его части, а также может быть особенно полезен при пестром строении и частом чередовании фаций или гранулометрических разновидностей грунтов, которое затрудняет детальное расчленение. В данном случае мы получили незакономерную изменчивость состава грунтов в любом сечении толщи, а значит, можем вполне обоснованно принять случайный характер распределения и показателей их свойств.

4.2. Поле изменения плотности грунтов

На картине поля плотности грунтов (рис. 6), значения которой в целом варьируют от 1,4 до 2,2 г/см³, видно, что изменение ее с глубиной соответствует скачкообразной незакономерной изменчивости. Гистограмма распределения плотности иллюстрирует нормальное распределение данных. Но на этом фоне наблюдаются всплески частоты встречаемости как максимальных, так и минимальных значений,

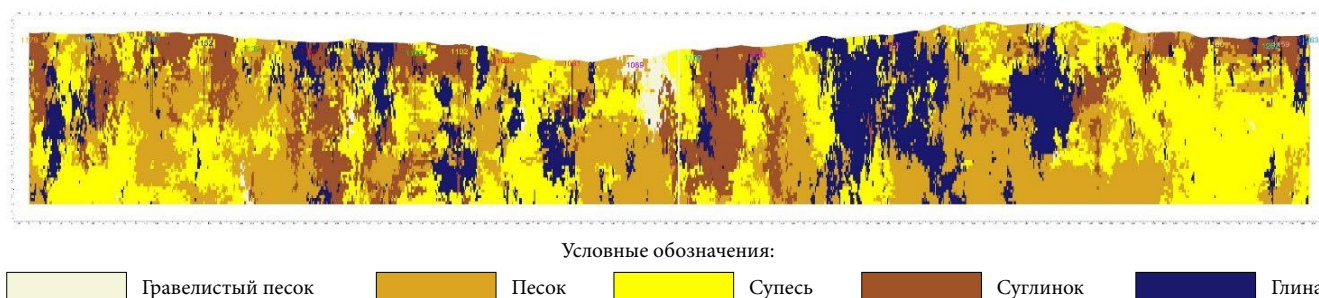


Рис. 5. Распределение гранулометрических разновидностей грунтов по полю индекса типа поведения грунта в верхней зоне разреза

которые в случае плотности характерны только для первой зоны — зоны распространения моренных и водно-ледниковых четвертичных отложений. В целом поле плотности достаточно однородно, ее изменение во всей толще происходит в диапазоне от 1,6 до 1,9 г/см³, помимо первой зоны, которая выделяется своей пестротой и явной неоднородностью.

При рассмотрении гистограммы плотности верхней зоны (четвертичных отложений) (рис. 7) выделяются два выпадающих из нормально распределенной выборки крайних диапазона значений — с минимальным 1,4 г/см³, приуроченных к глинам тугопластичной и мягкопластичной консистен-

ции, а также к пылеватому водонасыщенному песку и суглинку твердому и полутвердой консистенции; и с максимальным значением — 2,2 г/см³, которые получены для моренных супеси и суглинка твердой консистенции с включениями гравия и гальки. С последним фактом, вероятнее всего, и связаны эти повышенные значения плотности у суглинков и супеси. Относительно пониженные же значения плотности обусловлены частой заторфованностью приверхностных грунтов на этом участке.

Тем не менее следует отметить, что подобные отклоняющиеся значения плотности — это действительно лишь частные случаи на общем достаточно однородном фоне, так как плотность кем-

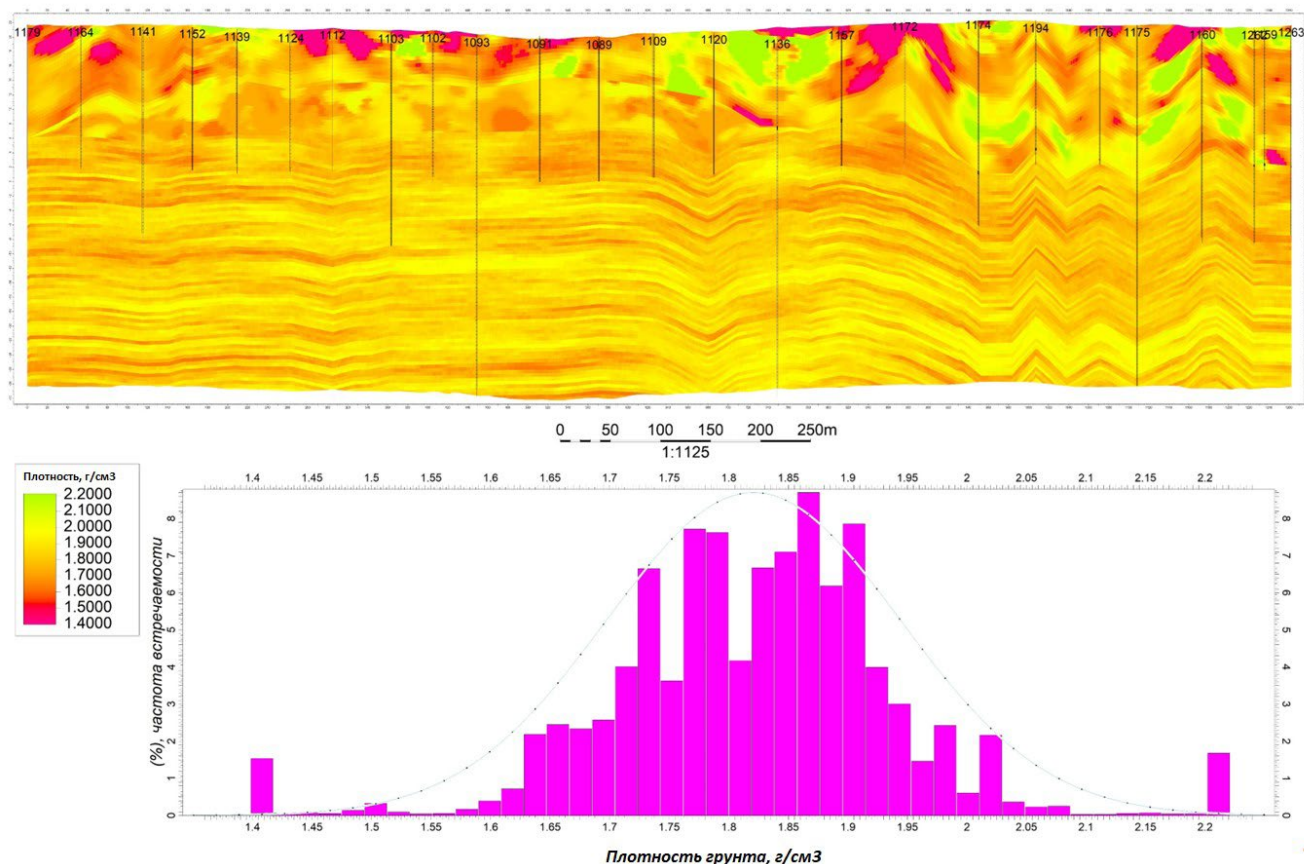


Рис. 6. Распределение показателя плотности грунтов в разрезе

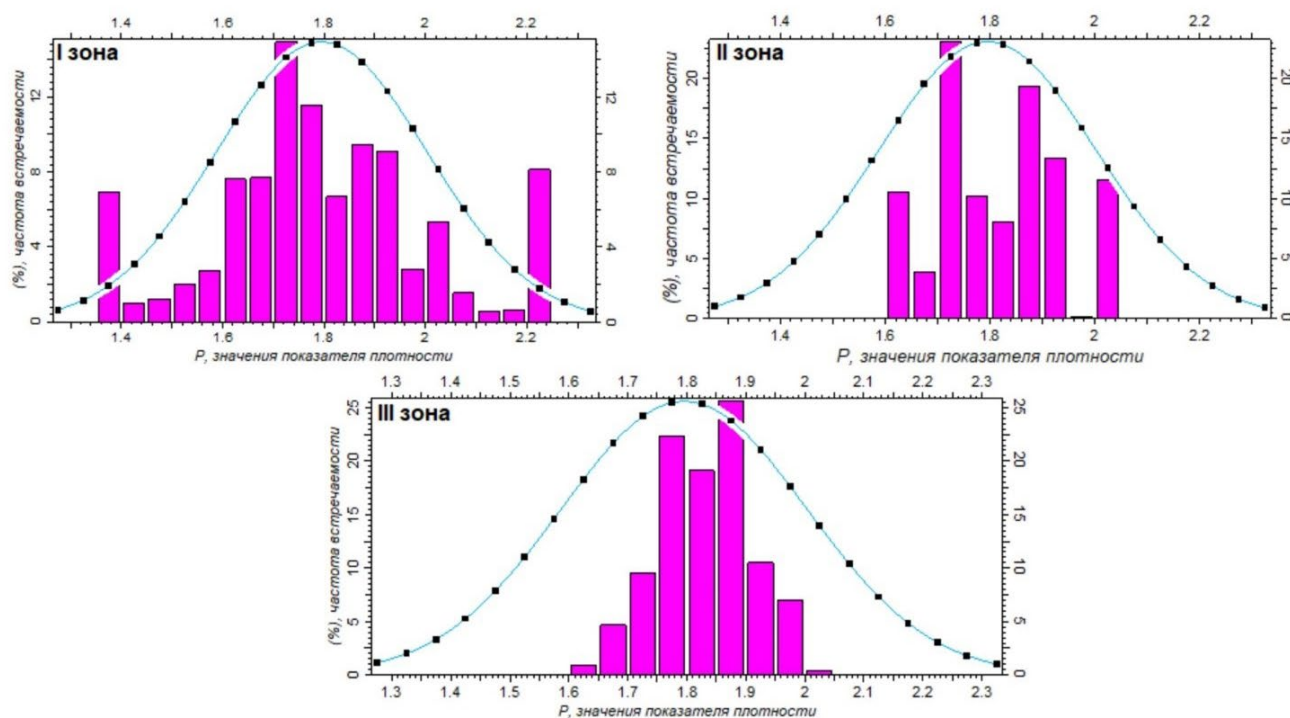


Рис. 7. Гистограммы распределения показателя плотности грунтов в каждой зоне (I-III) разреза

брийских глин оказалась близка к этому показателю для моренных и флювиогляциальных отложений. Иными словами, поле неоднородности по данному показателю характеризуется случайным распределением во всем рассмотренном пространстве и, следовательно, он не может быть скоррелирован с какими-либо другими показателями.

В то же время при анализе полей распределения параметра плотности следует еще раз обратить внимание, насколько отчетливо проступают внутренние границы в структуре полей параметров, которые хорошо видны в первой зоне также в связи с наличием врезанной палеодолины, то есть изополя показателей отображают ее форму, реагируя на заполнение иными грунтами, что подтверждает правильность проводимой интерполяции. Также анализ данных параметров показывает, что имеются две условно однородные зоны (II и III) и одна неоднородная зона. Это согласуется с геологическим строением и подтверждает работоспособность предлагаемой методики моделирования поля показателей свойств.

4.3. Поля изменения физико-механических свойств грунтов

В качестве характеристик физико-механических свойств авторами были выбраны модуль деформации и угол внутреннего трения, поскольку они могут быть получены для любых дисперсных грунтов из данных статического зондирования с конусом II типа (с отдельным измерением сопротивления под нако-

нечником зонда и на участке его боковой поверхности с одновременным контролем порового давления, возникающего при внедрении инструмента), в отличие от сцепления, поле которого в этом существенно песчаном разрезе получится малоинформативным из-за малого числа значений.

При анализе полей распределения показателей модуля деформации и угла внутреннего трения (рис. 8, 9), следует отметить, что в обоих случаях изменчивость, судя по градиенту цвета изополей, скачкообразная и незакономерная, что согласуется с неоднородностью верхней толщи, представленной на рисунке 4. В целом для верхней части массива преобладающие значения модуля деформации (рис. 8) варьируют в диапазоне от 50 до 100 МПа, а угла внутреннего трения (рис. 9) — от 28° до 34°. На этом фоне имеются всплески встречаемости в верхнем и нижнем квартилях. Аномально высокие для данного разреза значения модуля деформации — свыше 400 МПа и угла внутреннего трения — до 42° приурочены к плотным моренным супесям с примесью гравийно-галечного материала. Существенной особенностью графика распределения модуля деформации (рис. 8) является заметное количество значений (около 10%) показателя в диапазоне всего лишь 5–10 МПа. Эти значения встречаются в толще пятнами (черно-красные изополя на рисунке 8) и связаны с участками развития водно-ледниковых суглинков и глин, реже — пылеватых песков, местами обогащенных органическим веществом.

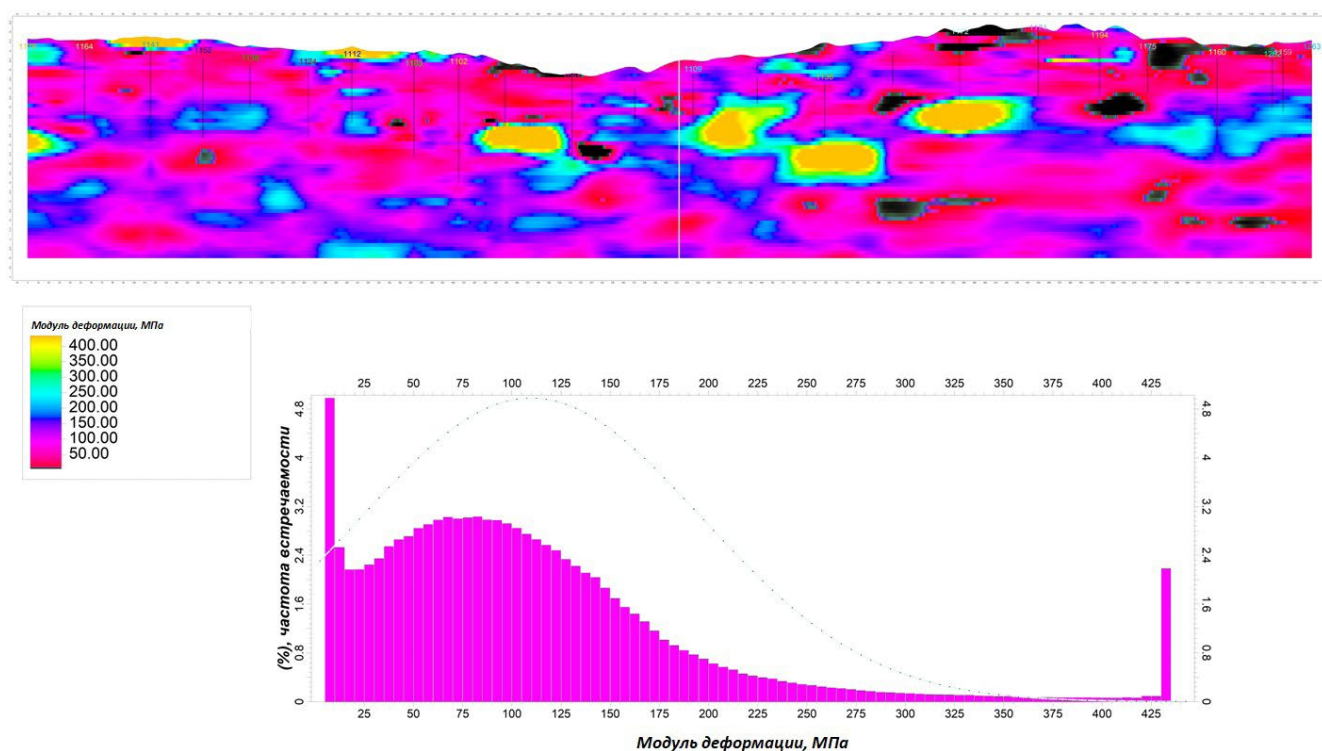


Рис. 8. Распределение модуля деформации грунтов в верхней части разреза

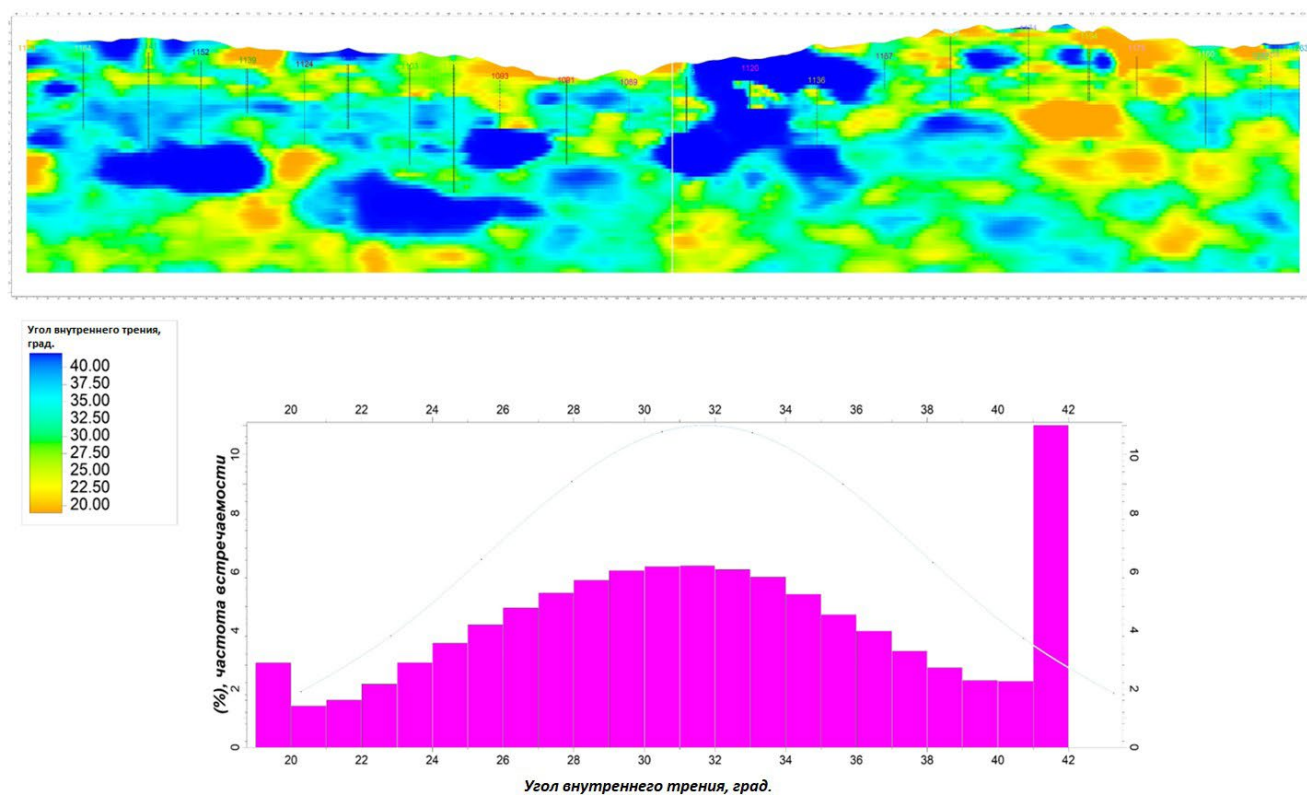


Рис. 9. Распределение угла внутреннего трения грунтов в верхней части разреза

Таким образом, в рамках представленной модели поля показателей физико-механических свойств тесно связаны с литологией и разновидностями грунтов по гранулометрическому составу.

В этом случае можно прийти к тому, что для корректных расчетов оснований в таких пестрых толщах вообще, может быть, не требуется выделение ИГЭ, если достаточно качественно изучено поле неоднородности каждого из необходимых параметров. Ведь факт построения поля показателя(ей) означает создание вероятностно-статистической модели основания, каждой точке которой сопоставлено конкретное значение исследуемой величины, что открывает принципиальную возможность не только для уточнения инженерно-геологической ситуации, но и для ее прямого использования в проектных расчетах.

4.4. Поле изменения суффозионной устойчивости грунтов

Аналогично показателям свойств грунтов, можно изучать пространственное распределение любых количественных характеристик процессов, происходящих в и массивах. В нашем случае в качестве примера, на котором демонстрируется возможность применения представленного подхода, рассмотрена суффозионная устойчивость широко распространенных в верхней части разреза четвертичных песков континентального генезиса, входящих, в свою очередь, в состав девяти разных ИГЭ. Оценка суффозионной устойчивости грунтов осуществлялась по двум показателям: на основе соот-

ношения максимального и минимального диаметра частиц, в соответствии с формулой М. П. Павчича (1961) (рис. 10), а также по коэффициенту неоднородности песков C_u (рис. 11):

$$d_{max}^{ci} \leq d_3 \dots d_5,$$

$$d_{max}^{ci} = 0,77d_{max}^0,$$

где d_{max}^{ci} — максимальный размер частиц, которые могут быть вынесены фильтрационным потоком в результате суффозии; d_{max}^0 — диаметр максимальных фильтрационных пор в грунте, определенный по формуле М. П. Павчича:

$$d_{max}^0 = 0,455k\sqrt{C_u}ed_{17},$$

где k — коэффициент неравномерности раскладки частиц в грунте или коэффициент локальности суффозии:

$$k = 1 + 0,05 C_u$$

$$C_u = \frac{d_{60}}{d_{10}},$$

где C_u — степень неоднородности грунта; d_{10} , d_{60} — диаметр частиц соответственно 10, 60 процентной обеспеченности (диаметры частиц, меньше которых в данном грунте содержится (по массе) соответственно 10, 60 % частиц); e — коэффициент пористости.

Приведенный анализ верхней части массива демонстрирует, что потенциально суффозионно-неустойчивые пески присутствуют, при этом выделенные зоны по обоим критериям конформны и локализованы в одних и тех же местах разреза.

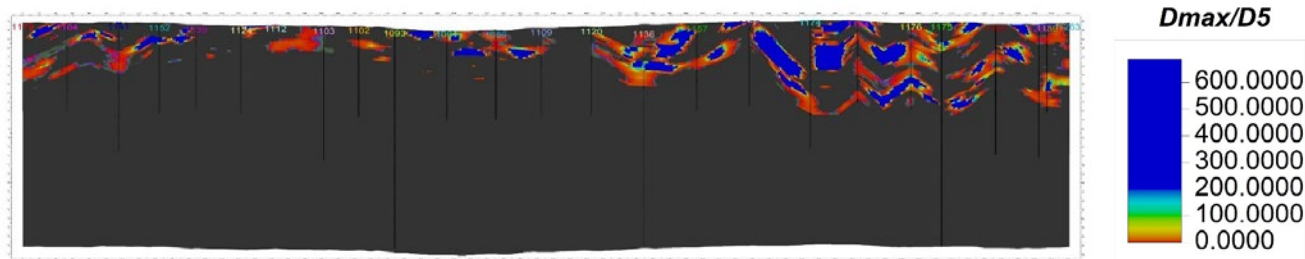


Рис. 10. Распределение зон суффозионно-неустойчивых грунтов по показателю D_{max}/D_5 в верхней части разреза (критическое значение 1.0)

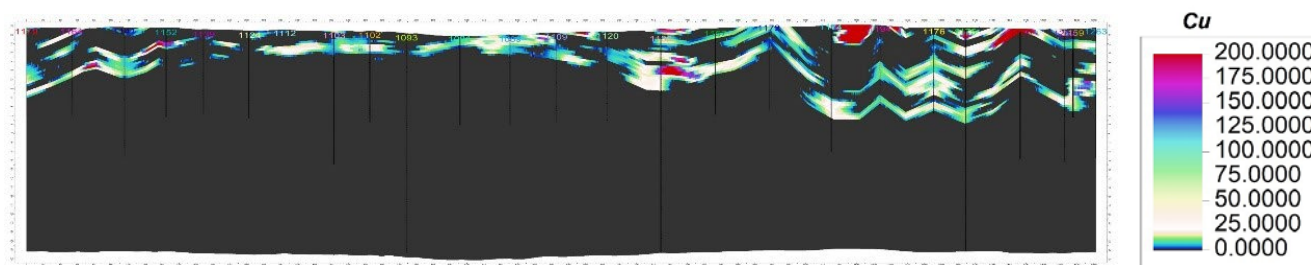


Рис. 11. Распределение зон суффозионно-неустойчивых песков по показателю неоднородности гранулометрического состава C_u в верхней части разреза (критическое значение 20)

Анализ всех рассмотренных выше в статье свойств грунтов, показывает, что построение полей распределения их показателей позволяет не только уточнить границы распространения тех или иных разностей грунтов в массиве, но и выявить, учесть те самые «аномально» высокие или низкие значения показателей, которые при стандартной статистической обработке могут быть попросту отбракованы, а они между тем часто оказываются значимыми для правильной оценки поведения массива в целом. Кроме этого, если сопоставить инженерно-геологический разрез с полями распределения показателей, то оказывается, что поля неоднородности параметров, необходимые для геотехнических расчетов и инженерных задач, могут совсем не соответствовать границам выделяемых ИГЭ.

Изучение изменчивости свойств грунтов дает возможность выявить особенности изменения полей разных показателей в одних и тех же местах, определить характер взаимосвязи показателей этих свойств и тем самым более обоснованно судить о закономерностях их поведения в массиве. Используемые же сегодня подходы к прогнозированию свойств грунтов в межскважинном пространстве, а также изменению характеристик в сложных инженерно-геологических системах дают лишь некоторую оценку меры неоднородности строения толщ, которая может заметно отличаться от истинной меры неоднородности и зависит от детальности изучения объекта.

Таким образом, пространственное моделирование неоднородности показателей состава и свойств грунтов позволяет получить дополнительную информацию, которая может быть учтена при выборе места расположения сооружения, для уточнения расчетов или назначения точек дополнительных исследований.

Выводы

1. Неоднородность грунтов проявляется в значимых различиях показателей их состава и свойств между двумя точками, а пространственная неоднородность рассматриваемых признаков определяет их изменчивость, характерную для всех грунтов. Оценку изменчивости свойств грунтов в массивах можно проводить с помощью методов математической статистики, не только дающих ее достаточно точную оценку, но и позволяющих

анализировать большие объемы фактических данных.

2. Структура полей геологических параметров различается для разных стратиграфо-генетических комплексов горных пород. При этом поля целого ряда показателей состава и свойств грунтов исследованного в работе массива отражают условия их залегания и осадконакопления, но достаточно однородны в пространственном отношении, и границы между выделенными многочисленными ИГЭ в них не проявляются. Такой анализ неоднородности позволяет увидеть общую картину строения массива или его части, может быть особенно полезен при пестром строении и частом чередовании разновидностей грунтов, характерном, например, для четвертичных отложений, затрудняет детальное расчленение разреза.

3. Внутри некоторых выделенных ИГЭ отмечаются заметные вариации показателей, особенно физико-механических свойств, обусловленные, в первую очередь, особенностями литологического состава грунтов, которые могут превышать их различия между ИГЭ. Кроме этого, поля изменения параметров, необходимых для геотехнических расчетов, могут не подтверждать границы выделяемых ИГЭ, что открывает возможность улучшения этого формального подхода или даже отходя от него.

4. Распределение ряда показателей (плотности, модуля деформации и угла внутреннего трения) характеризуется наличием всплесков в области максимальных и минимальных значений, являющихся не только дополнительной характеристикой неоднородности грунтов, но и свидетельствующих о не случайности таких «выбросов», об их типичности, которые целесообразно учитывать.

5. Анализ пространственной неоднородности массивов грунтов позволяет получить дополнительную полезную информацию и о потенциальной возможности развития в них неблагоприятных геологических процессов. Так, количественные характеристики гранулометрического состава песков дали возможность выявить в разрезе рассмотренного массива суффозионно-неустойчивые разности, положение которых следует учитывать при проходке котлованов и увеличении при этом гидравлических градиентов.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Бондарик Г. К., Ярг Л. А. Инженерно-геологические изыскания. 2-е изд. Москва. КДУ, 2008. 424 с.
2. ГОСТ 19912–2012 Грунты. Методы полевых испытаний статическим и динамическим зондированием.
3. Демьянов В. В., Савельева Е. А. Геостатистика: теория и практика. М.: Наука. 2010. 327 с.
4. Комаров И. С. Накопление и обработка информации при инженерно-геологических исследованиях. М., «Недра», 1972. 296 с.
5. Коломенский Н. В. Общая методика инженерно-геологических исследований. «Недра», 1968. 342 с.
6. Ломтадзе В. Д. Инженерная геология. Инженерная петрология. 2-е изд. Л.: «Недра», 1984. 511 с.
7. Матерон Ж. Основы прикладной геостатистики. Изд-во «Мир», 1968. 408 с.
8. Павлич М. П. Способ определения несущих гранулометрических составов грунта // Известия ВНИИГ. 1961. Т. 68. С. 197–202.
9. Chilès J.-P., Delfiner P. Geostatistics: Modeling Spatial Uncertainty, Wiley: New York. 1999, 695 p.
10. Journel A. G., Huijbregts C. J. Mining Geostatistics. Academic Press, London, 1978, 600 p.
11. de Marsily Gh., Delay F., Gonçalves J., Teles R.Ph.V. Violette S. Dealing with spatial heterogeneity, Hydrogeological Journal. 2005. 2005. 13. P.161–183.