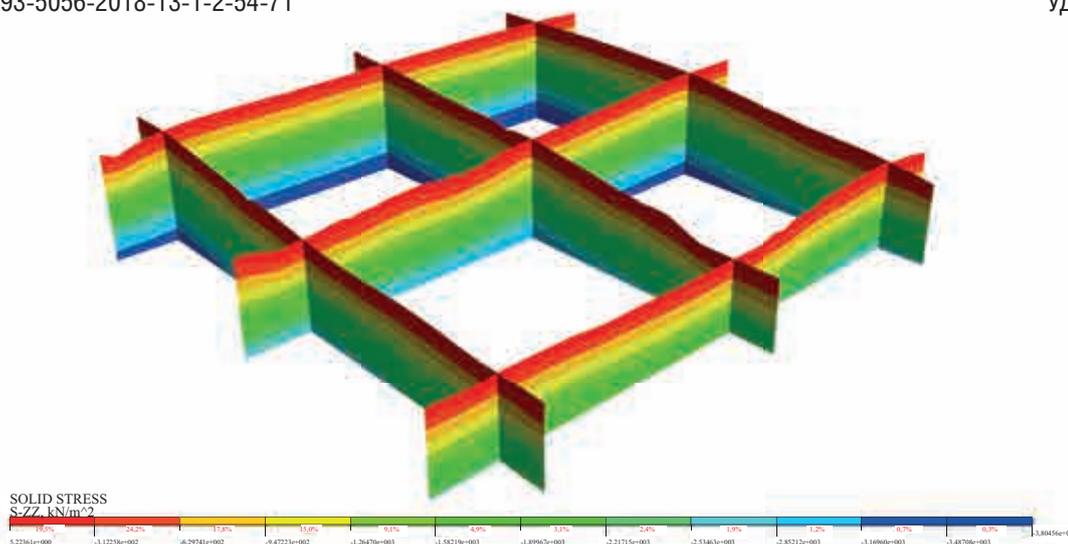


# СРАВНИТЕЛЬНЫЙ АНАЛИЗ РЕЗУЛЬТАТОВ ОЦЕНКИ НАПРЯЖЕННОГО СОСТОЯНИЯ ДИСПЕРСНЫХ ГРУНТОВЫХ МАССИВОВ В ДВУХМЕРНОЙ И ТРЕХМЕРНОЙ ПОСТАНОВКАХ МЕТОДОМ КОНЕЧНЫХ ЭЛЕМЕНТОВ В ПРОГРАММНОМ КОМПЛЕКСЕ MIDAS GTS NX

DOI: 10.25296/1993-5056-2018-13-1-2-54-71

УДК 624.131.38

**ПАЙШАНБИЕВ С.А.**

Московский государственный университет им. М.В. Ломоносова, г. Москва, Россия, paishanbiev.sino@gmail.com

**КАЛИНИН Э.В.**

Московский государственный университет им. М.В. Ломоносова, г. Москва, Россия, kalinin@sumail.ru

**БЕРШОВ А.В.**

ООО «ПетроМоделинг», Московский государственный университет им. М.В. Ломоносова, г. Москва, Россия, alexey.bershov@petromodeling.com

**Аннотация**

В статье приведен сравнительный анализ напряженного состояния дисперсного грунтового массива со сложными внешними и внутренними границами в двухмерной и трехмерной постановках. Впервые дается оригинальный подход к инженерно-геологической схематизации природных условий и верификации геолого-структурной модели при трехмерном моделировании на основе инженерно-геологического разреза. Указываются основные преимущества и недостатки двухмерного и трехмерного моделирования и метода конечных элементов. Показано, что основные преимущества и недостатки связаны либо с трудоемкостью самого процесса моделирования, либо с особенностями расчетов, приводящих к определенным ошибкам. Сравнительный анализ показал, что результирующие напряжения, действующие на одних и тех же площадках, полученные при расчетах в двухмерной и трехмерной постановках, характеризуются качественными и количественными отличиями. Данные отличия обусловлены в основном особенностями метода расчета напряженного состояния, его математическим аппаратом и способом дискретизации инженерно-геологической модели на конечные элементы. Также существенный вклад в достоверность результатов вносят форма и линейные размеры конечных элементов. Анализ результатов расчетов, полученных при двухмерном и трехмерном моделировании, показывает, что напряженное состояние верхней части грунтового массива со сложными инженерно-геологическими условиями детальнее описывается в двухмерной постановке, а учет пространственной неоднородности данной зоны массива — в трехмерной. В целом из анализа следует, что выбор метода расчета должен осуществляться на основе интегрированного анализа всех влияющих на результат факторов, а также практической целесообразности подхода, индивидуального для каждого природного объекта (грунтового массива), ввиду их многообразности, многокомпонентности и динамичности как системы.

**Ключевые слова:**

массив дисперсных грунтов; трехмерное и двухмерное инженерно-геологическое моделирование; напряженно-деформированное состояние; инженерно-геологическая схематизация

**Ссылка для цитирования:**

Пайшанбиев, С.А., Калинин, Э.В., Бершов, А.В., 2018. Сравнительный анализ результатов оценки напряженного состояния дисперсных грунтовых массивов в двухмерной и трехмерной постановках методом конечных элементов в программном комплексе MIDAS GTS NX. Инженерная геология, Том XIII, № 1–2, с. 54–71. DOI: 10.25296/1993-5056-2018-13-1-2-54-71.

# COMPARISON STUDY OF DISPERSE SOIL MASSIF STRESS STATE FEM ANALYSIS AT 2D AND 3D IN MIDAS GTS NX SOFTWARE

**PAISHANBIEV S.A.**

*Lomonosov Moscow State University, Moscow, Russia, paishanbiev.sino@gmail.com*

**KALININ E.V.**

*Lomonosov Moscow State University, Moscow, Russia, kalinin@sumail.ru*

**BERSHOV A.V.**

*«PetroModeling» LTD, Lomonosov Moscow State University, Moscow, Russia, alexey.bershov@petromodeling.com*

## Abstract

In this issue a comparative stress-strain analysis of a soil massif with complicated inner and outer boundaries in 2D and 3D is shown. For the first time an original approach to engineering-geological natural conditions schematization and geological-structural model verification for 3D modeling is given. This approach is based on the engineering-geological section. Main advantages and disadvantages of 3D modeling and finite element method are specified. It is shown, that main advantages and disadvantages are due to either modeling complexity, or calculation peculiarities, leading to certain mistakes. Comparative analysis has shown that resulting stresses on the same surfaces from 2D and 3D calculation have qualitative and quantitative differences. These differences are determined mainly by stress state calculation peculiarities, its mathematical apparatus and engineering-geological discretization method to finite elements. Finite elements form and linear dimensions also contribute to calculation reliability. 2D and 3D calculation results analysis shows that soil massif upper part stress state with complicated engineering-geological conditions is more detailed in two-dimensional problem, and its spatial non-uniformity — in three-dimensional. Generally, this analysis shows, that calculation method should be chosen with all the factors, influencing calculation results taken into account, and also practical expediency, individual for each natural object (soil massif), according to their diversity, multicomponent and dynamism as a system.

## Key words:

massif of disperse soils; three-dimensional and two-dimensional engineering-geological model operation; stress-strain state; engineering-geological schematization

## For citation:

Paishanbiev, S.A., Kalinin, E.V., Bershov, A.V., 2018. Comparison study of disperse soil massif stress state FEM analysis at 2D and 3D in MIDAS GTS NX Software. *Engineering geology*, Vol. XIII, No. 1–2, с. 54–71. DOI: 10.25296/1993-5056-2018-13-1-2-54-71.

## Введение

При исследованиях устойчивости высоких склонов и бортов карьеров, изучении инженерно-геологических условий подземного строительства, оценке оснований сооружений глубокого заложения и в других случаях наряду с характеристикой прочности массива пород большое значение имеют величины и распределение напряжений [10].

Интенсификация строительства разнообразных инженерных сооружений за последние годы привела к тому, что большинство территорий с благоприятными инженерно-геологическими условиями были полностью освоены. Инженерам-геологам все больше приходится исследовать новые участки со сложными инженерно-геологическими условиями, которые ранее считались непригодными для хозяйственной деятельности человека. Для решения такой задачи требуется более детальная информация о строении и свойствах исследуемых грунтовых массивов. Важнейшей частью данной информации является характеристика напряженно-деформированного состояния (НДС) природного массива и анализ его изменения при производстве строительных работ, проходке горных выработок и эксплуатации подземных сооружений и тоннелей.

Изучение НДС массивов пород необходимо выполнять на всех стадиях инженерно-геологических исследований для решения таких вопросов, как выбор места расположения сооружений, определение характера и степени их влияния на перераспределение напряжений в грунтовых массивах, а также с целью проектирования комплекса мероприятий по защите территорий и сооружений [12] от неблагоприятных последствий современных инженерно-геологических процессов<sup>1</sup> [5, 14, 18]. Важно подчеркнуть, что изучение грунта не будет полным, пока не составится ясная картина обо всей системе напряжений, действующих как в верхних, так и в более глубоких слоях грунтового массива под нагруженной поверхностью, и об изменениях, возникающих в грунте под влиянием этих напряжений<sup>1</sup> [11, 15, 21]. Только детальное выявление зависимости величин напряжений и положения зон их концентрации от морфологии поверхности массива, геологического строения и свойств пород их слагающих, от разнообразных внешних воздействий как естественных, так и техногенных, предоставит возможность оценки устойчивости территорий при их хозяйственном освоении.

В инженерной геологии на современном этапе ее развития для получения ясной картины обо всей системе

<sup>1</sup> Цытович, Н.А., 1963. *Механика грунтов: учебное пособие*. Госстройиздат, М.

напряжений, действующих в грунтовом массиве, используют различные методы расчета напряжений и деформаций, широко применяемые в теории упругости и пластичности, а также в других смежных отраслях науки и техники.

Для изучения НДС массивов дисперсных грунтов в XX веке было разработано большое количество методов, которые в настоящее время широко применяются при инженерно-геологических и геотехнических исследованиях. Следует отметить, что разработанные отечественными и зарубежными учеными методы в должной мере не были адаптированы для описания естественного поведения «плохо организованных систем» — дисперсных грунтов и их массивов<sup>2</sup>, так как изначально были предложены для изучения НДС «упругих» тел (композиционных материалов, скальных и полускальных грунтов). Именно поэтому значительная часть прогнозных задач инженерной геологии, связанных с дисперсными пространственно-неоднородными грунтовыми массивами, основанных на анализе их напряженного состояния, не дают достаточно точных результатов.

В последнее время большое внимание при решении инженерно-геологических задач уделяется развитию нелинейной механики грунтов, в которой рассматриваются вопросы пластических деформаций и ползучести. Основы данного направления исследований были разработаны такими видными исследователями, как Г.Г. Болдырев, С.С. Вялов, М.Н. Гольдштейн, Ю.К. Зарецкий, Г.С. Золотарев, Э.В. Калинин, В.Д. Ломтадзе, Н.Н. Маслов, Н.В. Орнатский, З.Г. Тер-Мартirosян, А.Б. Фадеев, Н.А. Цытович, А.Г. Шашкин, В.М. Шестаков и другими.

Кроме вышеперечисленных проблем, в настоящее время довольно бурно развивается методика проведения расчетов напряженного состояния массивов горных пород в трехмерной постановке. Это происходит потому, что геологические и инженерно-геологические процессы развиваются не только во времени, но и в трехмерном пространстве<sup>3</sup> [13]. Следует отметить, что в инженерной геологии, начиная с первых дней ее формирования как науки, визуализация и анализ информации всегда проводились в объемной (трехмерной) постановке, чему могут свидетельствовать системы традиционных графических инженерно-геологических моделей, составленных в виде карт и разрезов.

В последние годы все больше специалистами решаются задачи по оценке устойчивости и анализу НДС грунтовых массивов в объемной (трехмерной) постановке. Данная тенденция, на первый взгляд, не характеризуется какой-либо научной новизной, а лишь является следствием влияния интенсивного развития современной науки и техники. Наблюдая историю развития математического моделирования поведения грунтов и геологических массивов, можно прийти к выводу, что основная причина слабого развития трехмерного моделирования в XX веке была связана с громоздкостью обрабатываемой информации. Благодаря современным технологиям, новым электронно-вычислительным машинам (ЭВМ) данный барьер был преодолен, что и способствовало массовому применению трехмерного моделирования в инженерной практике, которое наиболее

ярко наблюдается в западных странах. В странах СНГ к такому развитию событий относятся с осторожностью, при этом незначительная часть исследователей считает, что массовое внедрение объемного моделирования в инженерную практику является необходимой [3] (в связи с переходом к цифровой передаче информации, в частности данных инженерных изысканий) и актуальной задачей.

Несмотря на некоторый (достаточно обоснованный) скептицизм по отношению к данному вопросу, рассматриваемая методика имеет ряд положительных сторон. Учитывая тот факт, что массив дисперсных грунтов является крайне сложным в геолого-структурном отношении и неоднородным в плане свойств геологическим объектом, для достаточно точной оценки его напряженного состояния необходимо приложить огромные усилия. Как показывает практика, не всегда путем решения плоской задачи удастся детально охарактеризовать напряженное состояние целого массива как систему, так как его компоненты — геологические тела (литологические пачки, геолого-генетические комплексы, инженерно-геологические элементы и расчетные геологические элементы) — характеризуются пространственной неоднородностью (прерывистостью). Именно поэтому для дисперсных грунтовых массивов, в связи с их сложностью, рациональнее оценивать напряженное состояние в трехмерной постановке, чтобы не производить многочисленные расчеты в двухмерной постановке, так как ресурсы, затрачиваемые на решение плоских задач, могут быть соизмеримы с затратами решения задач при трехмерной постановке, а иногда даже их превышать. В то же время возникает вопрос относительно точности трехмерной модели и достаточности исходной информации для ее построения. Данный вопрос является весьма актуальным, что в первую очередь связано с дефицитом исходных данных и геологической информации, получаемой при инженерных изысканиях. Также возникает парадоксальная ситуация с детальностью моделирования геологических тел в двухмерной и трехмерной постановках. Парадоксальность заключается в том, что при двухмерном моделировании мы имеем возможность отобразить геологические неоднородности (линзы и т.д.) в расчетных схемах, несмотря на их количество и геометрические размеры. При этом не имеем возможности достаточно точно охарактеризовать напряженное состояние массива в целом, ввиду его пространственной неоднородности. Решая трехмерную задачу, мы можем охарактеризовать напряженное состояние массива с учетом пространственной неоднородности геологических тел, но при этом не имеем возможности детального моделирования локальных неоднородностей грунтового массива. Приведенные выше положения еще раз подтверждают тот факт, что большинство исследователей, не понимая тонкости данных подходов, утверждают об исключительном превосходстве объемного моделирования. Решая такую сложную задачу как оценка НДС дисперсных грунтовых массивов, необходимо анализировать рациональность применения того или иного подхода применительно к конкретному природному объекту, исходя из поставленной цели.

<sup>2</sup> Каждан, А.Б., Гуськов, О.И., 1990. Математические методы в геологии: учебник для вузов. Недра, М.

<sup>3</sup> Калинин, Э.В. Инженерно-геологические расчеты и моделирование: учебник для вузов. МГУ, М.

При расчетах устойчивости грунтовых массивов трехмерное моделирование позволяет в полной мере учитывать факторы [16, 19, 20], оказывающие существенное влияние на устойчивость (например, тектонические разломы, пересекающие склон под углом, подрезку части склона при строительстве дороги, скошенную геометрию тел, изменение уровня подземных вод в пространстве и т.д.), которые сложно учесть при двухмерном моделировании.

К огромному сожалению, в отечественных и зарубежных литературных источниках весьма редко встречается анализ результатов изучения НДС в плоской и объемной постановках, что заставляет специалистов, работающих в данном направлении, выбрать метод и методику расчета «вслепую». Наиболее известные современные программы компьютерного инженерного анализа основаны на использовании метода конечных элементов (МКЭ). Примерами комплексов являются пакеты программ ANSYS, MSC.NASTRAN, MSC.MARC, COSMOS, ABAQUS, PLAXIS 2-3D, MIDAS GTS NX 2-3D и др. Чтобы эффективно использовать вышеперечисленные программные средства, инженеру-геологу необходимо знать не только теорию исследуемого геологического процесса, но и владеть теорией МКЭ. Полезно также иметь навыки программирования для понимания компьютерной реализации МКЭ.

Почти все представленные сегодня на рынке программные продукты работают по принципу «черного ящика» [23]. Пользователю предлагается заполнить некий вводный формат, в котором фигурируют более или менее привычные характеристики грунта, а затем дожидаться результата. При этом от пользователя остается скрытым механизм, положенный в основу используемой расчетной программы. В итоге пользователь вынужден либо довериться результату, либо попытаться проверить его доступными способами.

Метод конечных элементов является методом, основанным на использовании вариационного принципа Лагранжа. Идея построения вариационно-разностной схемы состоит в том, чтобы при специальном выборе координатных функций получить систему линейных алгебраических уравнений, совпадающую по структуре с системой разностных уравнений<sup>3,4</sup> [24].

Метод конечных элементов — это способ построения дискретных моделей континуальной среды, описываемой краевыми задачами для дифференциальных уравнений и сохраняющий важнейшие свойства последней<sup>3,5</sup> [22]. Данное определение не отражает полностью существа дела. Если смотреть шире, то метод конечных элементов — это технология решения краевых задач для дифференциальных уравнений на современных ЭВМ<sup>6</sup>.

С точки зрения практического использования метода конечных элементов, существенную роль играет выбор эффективного прямого или итерационного метода<sup>7</sup> [4] решения соответствующей системы линейных алгебраических уравнений, по возможности достаточно полно

учитывающего, например, разреженную структуру матрицы системы [7]. Особым преимуществом метода, с точки зрения практического использования, является возможность геометрического представления объекта, т.е. задание используемой при расчете нерегулярной сетки разбиения<sup>8</sup> [6].

С точки зрения инженерной геологии, основными преимуществами данного подхода являются:

- свойства материалов смежных элементов могут быть различными, что позволяет применять метод для моделирования НДС существенно неоднородных сред [11], какими в инженерной геологии являются грунтовые массивы;
- методом можно пользоваться для областей с любой формой внешних и внутренних границ;
- размеры элементов могут быть переменными, что позволяет укрупнять или измельчать сеть разбиения области на элементы;
- с помощью МКЭ возможно рассмотрение граничных условий с разрывной поверхностной нагрузкой, а также смешанных граничных условий.

Авторами настоящей статьи было изучено НДС неоднородного дисперсного массива, слагающего левый берег долины р. Куньи (Сергиево-Посадский район Московской области).

### **Краткое описание инженерно-геологических условий исследуемого грунтового массива**

Исследуемый массив расположен в северо-восточной части Московской области, в 20 км к востоку от г. Сергиева Посада (рис. 1), в пределах склона древней переуглубленной долины р. Куньи (левый приток р. Дубны). Абсолютные отметки поверхности платообразного водораздела массива составляют 250–260 м, возвышающегося на 100–110 м над дном долины.

В геологическом отношении рассматриваемая территория приурочена к северо-западному склону Клиньско-Дмитровской гряды и расположена в центральной части московской синеклизы. Геологическое строение данной территории характеризуется развитием мощного чехла рыхлых песчаных и глинистых отложений.

Общие черты геологического строения участка определяются наличием двух структурно-стратиграфических ярусов. Основу геологического разреза образуют мезозойские (главным образом меловые) отложения. Они залегают практически горизонтально и представляют собой ритмично чередующиеся пласты и пачки, преимущественно песчаного и глинистого состава. При построении моделей за нижнюю стратиграфическую границу геологического разреза в районе исследуемого массива приняты юрские отложения. С поверхности развита толща кайнозойских (главным образом четвертичных) отложений. Они формируют современный рельеф и заполняют глубокие погребенные эрозионные врезы. В качестве основных стратиграфических единиц исследуемого массива дисперсных грунтов, (снизу-вверх, рис. 2) были выделены:

<sup>4</sup> Андреев, В.Б., 2010. Лекции по методу конечных элементов: учебное пособие. Издательский отдел факультета ВМиК МГУ им. М.В. Ломоносова, М.

<sup>5</sup> Присекин, В.Л., Расторгуев, Г.И., 2010. Основы метода конечных элементов в механике деформируемых тел: учебник. Изд-во НГТУ, Новосибирск.

<sup>6</sup> Победра, Б.Е., 1981. Численные методы в теории упругости и пластичности: учебное пособие. МГУ, М.

<sup>7</sup> Верификационный отчет по ПК MIDAS GTS, 2012. Т. 1. Общие сведения. Матрицы верификации. ООО «Подземпроект», М.

<sup>8</sup> Даутов, Р.З., Карчевский, М.М., 2004. Введение в теорию метода конечных элементов: учебное пособие. Казанский государственный университет им. В.И. Ульянова-Ленина, Казань.

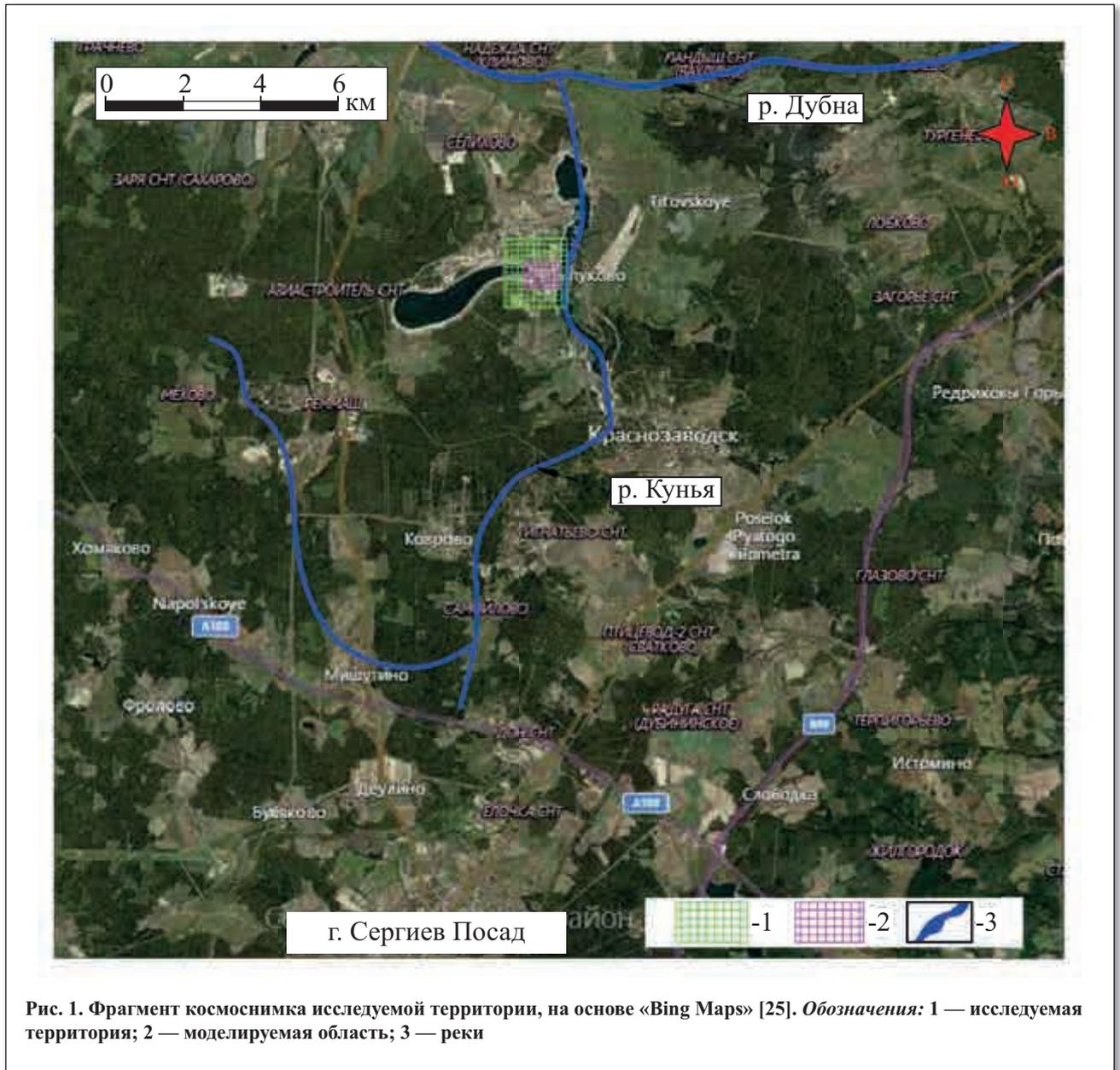


Рис. 1. Фрагмент космоснимка исследуемой территории, на основе «Bing Maps» [25]. Обозначения: 1 — исследуемая территория; 2 — моделируемая область; 3 — реки

- келловей-оксфордские глинистые отложения, преимущественно монтмориллонитового состава ( $J_3cl-ox$ ). Кровля отложений расположена на абсолютных отметках 35–60 м (ИГЭ-18);
  - апт-альбские песчаные отложения ( $K_1ap-al_2$ ) мощностью до 65 м. Залегают отложения на абсолютных отметках 65–140 м (ИГЭ-16);
  - верхнеальбские, преимущественно глинистые отложения ( $K_1al_3$ ), залегающие в интервале отметок 140–175 м (ИГЭ-14). Представлены парамоновскими черными глинами монтмориллонитового состава, перекрытыми слоем тонких темно—серых глинистых песков мощностью 3–5 м (ИГЭ-14а);
  - сеноманские пески ( $K_2cm$ ) мощностью около 13 м, на склоне переуглубленной долины, местами размывы (ИГЭ-13);
  - сантонские зеленоцветные отложения ( $K_2st$ ) — мощность их сильно варьирует от 1–2 до 10–15 м в связи с невыдержанным положением кровли, в значительной степени эродированной (ИГЭ-10).
- Современный рельеф массива в основном сформирован суглинистыми образованиями морены московского оледенения

(glQIIms) (ИГЭ-5 и ИГЭ-6). Долина р. Куны наследует древний эрозионный врез глубиной свыше 200 м, заполненный тонкопесчаными лимногляциальными и флювиогляциальными отложениями, преимущественно днепровско-московского времени (fgl, lglQII dn-ms) (ИГЭ-9).

Зоны в сантонских отложениях соответствуют одноименным генерациям оползневых тел, которые в свою очередь характеризуются собственными вещественно-структурными особенностями. Зона II является наиболее ранней генерацией оползня, зона III — самой поздней. Глинистые грунты, слагающие зону III, характеризуются наихудшими прочностными и деформационными показателями.

На разных этапах геологического развития долины р. Куны при активизации гравитационных процессов на ее склонах формировались древние и современные оползневые отложения, которые в свою очередь определяют современную специфику гидрогеологических условий и НДС всего массива. Среди оползневых отложений по результатам исследований были выделены (см. рис. 2): — оползневые блоки парамоновских глин dpQII( $K_1al_3$ ) в левом борту древнего переуглубления (ИГЭ-15);

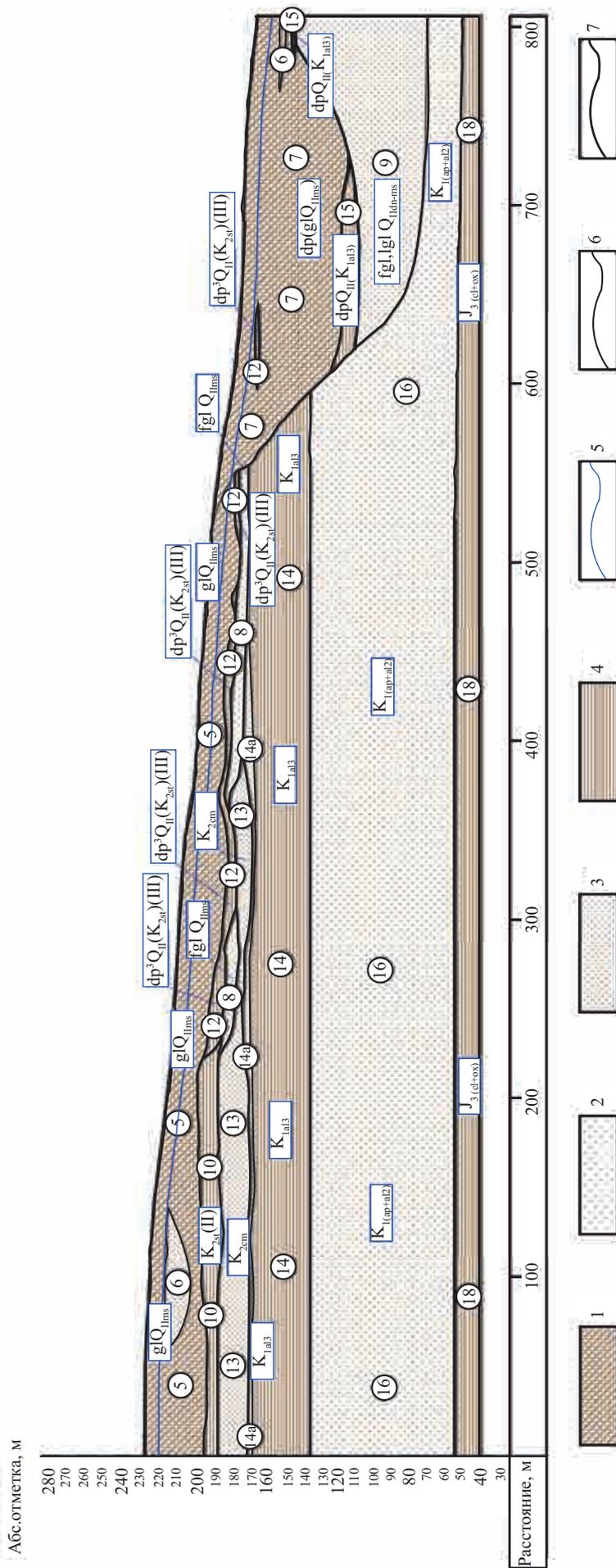
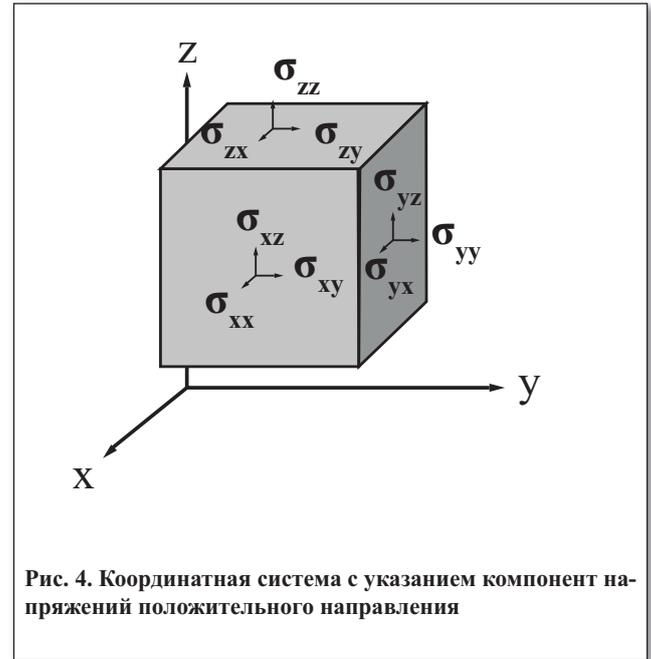


Рис. 2. Инженерно-геологический разрез (1–1) исследуемого грунтового массива. *Обозначения:* 1 — моренный суглинок; 2 — песок преимущественно разнозернистый; 3 — песок мелкий; 4 — глина; 5 — уровень грунтовых вод; 6 — литологические границы; 7 — стратиграфические границы



- сантонские «зеленые глины» ( $dp^3QII(K_2st)$ ) (зона III) в основании морены на левобережном склоне долины (ИГЭ-12);
- дислоцированная морена ( $dp(glQIIms)$ ) в нижних частях склонов современной долины (ИГЭ-7).

Гидрогеологическое строение участка представлено четырьмя водоносными горизонтами. Первый от поверхности водоносный горизонт имеет безнапорный характер и приурочен преимущественно к ледниковым моренным образованиям. Остальные водоносные горизонты являются напорно-безнапорными и приурочены к меловым отложениям и водно-ледниковым грунтам палеодолины. В рамках рассматриваемой работы при расчете НДС в модели рассматривался только первый от поверхности водоносный горизонт, имеющий безнапорный характер.

Исследуемый массив был выбран, исходя из того, что он является наиболее изученным в геологическом отношении участком, который представлен чередующимися пачками исключительно песчано-глинистых грунтов с различными физическими и физико-механическими свойствами.

### Методика исследований

Методика создания и расчета любой инженерно-геологической модели характеризуется собственными технико-методологическими особенностями и определяется степенью сложности геологического строения (нелинейностью и непрерывностью внутренних и внешних границ), гидрогеологических и геоморфологических условий, а также физико-механических свойств грунтов моделируемой области. С другой стороны, расчетная схема или схема для моделирования зависит от выбранного способа, так как нет необходимости отражать на схеме те черты строения или свойств изучаемого объекта<sup>3</sup>, которые не учитываются выбранным способом расчета или моделирования.

В ходе настоящих исследований расчеты по оценке НДС дисперсного массива выполнялись в рамках решения плоской и объемной задачи теории упругости методом конечных элементов с использованием программного комплекса MIDAS GTS NX 2016.

Для моделирования свойств грунтов исследуемого натурного объекта была использована модель идеально-упруго-пластической среды Мора-Кулона (рис. 3).

Основное преимущество используемой модели заключается в простоте назначения параметров, которые можно почерпнуть в любом отчете по инженерно-геологическим изысканиям [23]. При практическом применении, а именно при моделировании дисперсных массивов со сложными инженерно-геологическими условиями, сложность моделей играет скорее негативную роль, не всегда позволяя исследователю четко представить себе особенности работы модели в различном напряженном состоянии. Принимается, что в инженерной практике моделирование сложных объектов должно воспроизводиться более простыми доступными методами, а моделирование простых природных объектов сложными.

При расчете НДС в программном комплексе MIDAS GTS NX во всех случаях считается, что выходные сжимающие напряжения и усилия (включая поровое давление) имеют отрицательные значения, а растягивающие напряжения и усилия являются положительными. Напряжения и деформации в модели определяются в глобальной декартовой системе координат (GCS). Положительные направления напряжений и координатная система представлены на рис. 4.

### Методика построения плоской модели

Построение плоской конечно-элементной модели в программном комплексе MIDAS GTS NX 2016 основано на проведении инженерно-геологической схематизации природного массива и создании его геометрической модели.

Схематизация природных условий осуществляется в несколько этапов. На первом этапе инженерно-геологической схематизации строятся инженерно-геологические разрезы, в которых дается общая характеристика природной обстановки изученного объекта. На втором этапе создаются специализированные карты и разрезы исследуемого объекта, где по возможности более подробно показываются те черты природной обстановки, от которых будет зависеть развитие изучаемых современных

процессов. В зависимости от сложности природных условий и решаемой задачи специализированных карт и разрезов (инженерно-геологических моделей) может быть несколько. На последнем этапе составляются расчетные схемы или схемы для моделирования, в которых учитываются требования выбранного метода расчета или способа моделирования<sup>3</sup>. Схематизация природных условий является первостепенной задачей при моделировании природных объектов, а именно массивов дисперсных грунтов со сложными внутренними и внешними границами<sup>9</sup> [17]. Достоверный учет влияния внешних факторов на НДС невозможен без начальной инженерно-геологической схематизации.

В рамках рассматриваемой статьи основой для оценки НДС дисперсного массива с использованием двумерной модели в программном комплексе MIDAS GTS NX 2016 послужил инженерно-геологический разрез 1–1 (см. рис. 2 и рис. 10), который был построен по наиболее вероятному направлению развития концентраций напряжений и сдвиговых деформаций, исходя из строения геологического массива. Геомеханическая схема (рис. 5), используемая при расчете, полностью соответствует инженерно-геологическому разрезу (см. рис. 2). Для расчета применялись расчетные физико-механические характеристики грунтов, указанные в таблице.

Весьма важным при моделировании напряженного состояния любых природных объектов является дискретизация моделируемой области. Важность данного процесса заключается в том, что величины напряжений, которые мы получаем при моделировании, напрямую зависят от степени дискретизации области (от размеров конечных элементов), а также от форм дискретных элементов. Как показывает практика, упомянутая зависимость ярче всего проявляется при расчетах устойчивости грунтовых массивов. В этих расчетах, при неверном подходе можно получить значительную ошибку именно в программном комплексе MIDAS GTS NX 2016. Также немаловажным

является принцип построения сеток конечных элементов в зависимости от кривизны границ (внутренних и внешних) модели. Это связано с отклонением аппроксимирующей дискретной границы (поверхности в 3D) от реальной гладкой [8, 9, 22]. Чем больше кривизна гладкой поверхности и размер конечных элементов, тем больше получается отклонение границ конечно-элементной модели от геомеханической схемы. Отсюда вытекает основное правило построения сеток конечных элементов: сгущение сети в местах высоких градиентов, что и было реализовано при моделировании в данной работе.

Расчетная двумерная модель характеризуется линейными размерами в горизонтальном направлении (вдоль оси X) — 833 м, и в вертикальном (вдоль оси Y) 198 м.

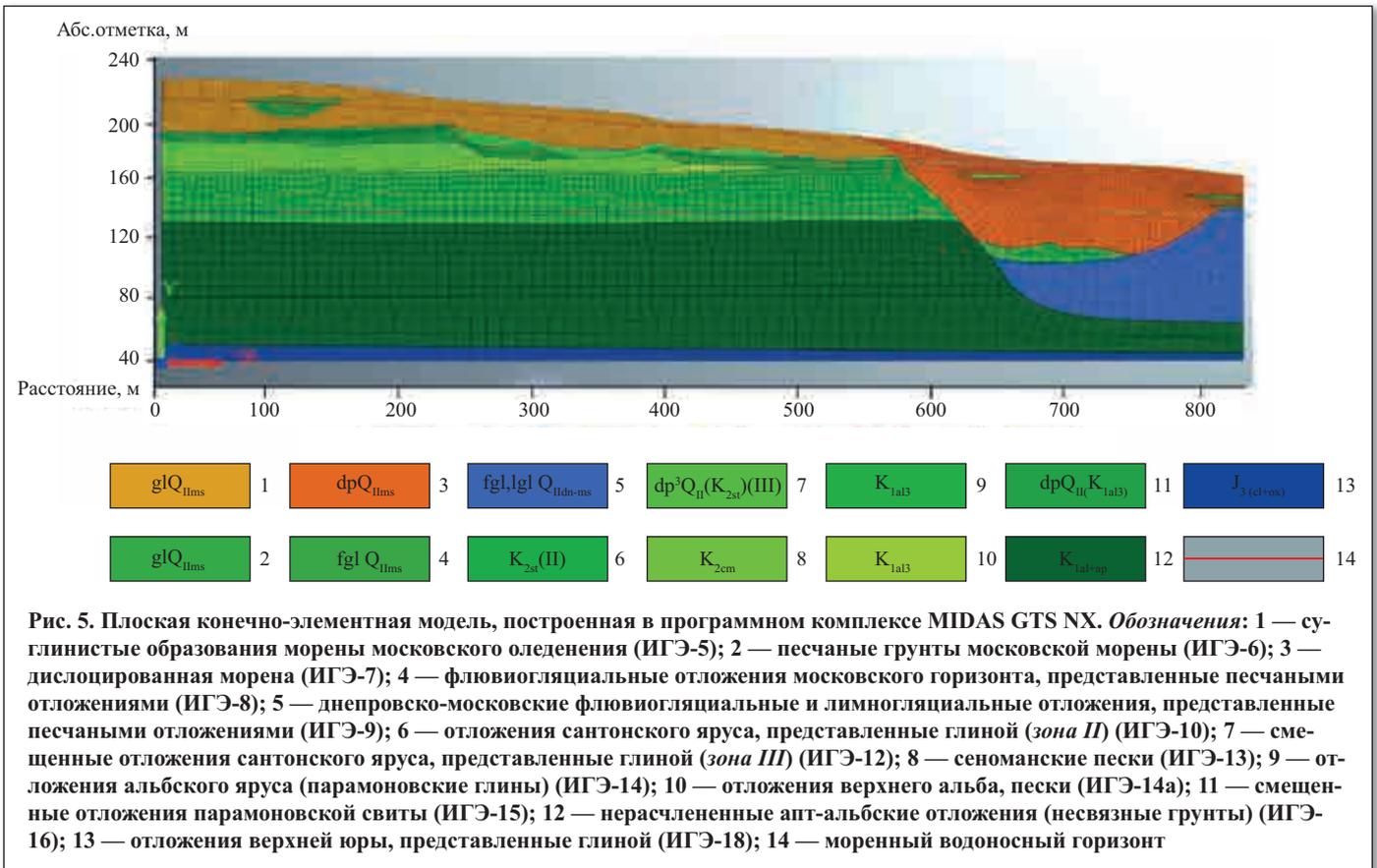
#### Методика построения объемной модели

Трехмерное моделирование требует применения многоуровневого подхода и традиционно выполняется в два этапа. На первом этапе моделирования производится обработка и анализ инженерно-геологической информации, а также инженерно-геологическая схематизация природного массива<sup>3</sup>. На втором этапе моделирования в среде MIDAS GTS NX создается объемная геологическая и последующая конечно-элементная модель исследуемого массива. Процесс создания расчетной схемы и инженерно-геологической схематизации определяется целью проводимых исследований, методом расчета, а также техническими возможностями программного комплекса, в котором планируется построение модели. Выбор программного комплекса и ЭВМ является важнейшим аспектом при моделировании напряженного состояния неоднородных природных массивов. В связи с этим уместно отметить слова крупнейшего специалиста в области численных методов Дж. Аргириса: «какой бы подход ни использовался в расчете, важно понять, что отделение теоретических основ метода от машинной реализации было бы огромной ошибкой. ЭВМ должна определять теорию метода» [1].

Таблица

Параметры грунтов исследуемого массива, подобранные для модели Мора-Кулона и используемые при расчетах в программном комплексе MIDAS GTS NX														
Параметр	Обозначение	Ед. изм.	ИГЭ											
			5	7	8	9	10	12	13	14	14а	15	16	18
Объемный вес грунта выше уровня грунтовых вод	$\gamma$	кН/м <sup>3</sup>	23,3	22,6	26,6	17,6	17,2	18,1	18,9	19,4	17	18,7	19,8	19
Объемный вес грунта ниже уровня грунтовых вод	$\gamma_{sat}$	кН/м <sup>3</sup>	23	22,7	20,3	18,6	17,4	18,3	18,3	19,4	18,9	18,9	20,4	19,2
Начальный коэффициент пористости	$e_{ini}$	—	0,298	0,346	0,41	0,458	1,87	1,036	1,156	0,774	0,501	0,927	0,613	0,905
Модуль деформации	$E$	кН/м <sup>2</sup>	19 000	20 000	36 000	29 000	9 000	14 000	15 000	16 000	28 000	33 000	43 000	20 000
Коэффициент Пуассона	$\nu$	—	0,24	0,29	0,24	0,26	0,39	0,38	0,22	0,37	0,25	0,37	0,23	0,37
Угол внутреннего трения	$\varphi$	град.	28	17	30	20	16	3	29	22	26	9	31	20
Удельное сцепление	$c$	кН/м <sup>2</sup>	11	16	4	5	24	25	6	17	0,1	10	4	80

<sup>9</sup> Ашихмин, В.Н., Гитман, М.Б., Келлер, И.Э., Наймарк, О.Б., Столбов, В.Ю., Трусов, П.В., Фрик, П.Г., 2005. Введение в математическое моделирование: учебное пособие. Логос, М.



Для построения начальной инженерно-геологической схемы была проведена обработка порядка 600 инженерно-геологических скважин и оцифровка 25 инженерно-геологических разрезов исследуемого массива.

Модель грунтового массива строилась поэтапно на основе проанализированных данных инженерно-геологических изысканий и архивных материалов. На первом этапе моделирования была сформирована база данных всех архивных скважин. В базе данных указывались координаты скважин, включая абсолютные отметки геологических тел. На втором этапе пошагово были построены цифровые матрицы подошв геологических тел и рельефа с использованием дополнительных программных комплексов (surfer 13, AutoCad 15 и т.д.). На третьем этапе с помощью ранее созданных матриц были построены трехмерные поверхности рельефа грунтового массива и геологических тел (инженерно-геологических элементов). Построение и обработка цифровых (матриц) поверхностей проводились по следующей схеме: создание базы данных → создание изолиний в ПК surfer 13 → обработка изолиний в ПК AutoCad 15 → обработка и верификация изолиний с архивными инженерно-геологическими разрезами в ПК AutoCAD Civil 3D → построение трехмерных (3D) поверхностей в ПК MIDAS GTS NX инструментом Terrain Geometry Maker (рис. 6).

На четвертом этапе в программном комплексе MIDAS GTS NX были построены объемные элементы (тела) грунтов (рис. 10). На присвоенный набор свойств в соответствии с таблицей указывает цвет геологического тела в конечно-элементной модели.

Особое внимание при сравнительном анализе двух различных постановок по отношению размерности пространства<sup>9</sup> (3D и 2D) следует уделять процессу верификации объемных геологических тел, которые были построены ме-

тодами пространственной интерполяции. Совершенно очевидно, что двухмерная геомеханическая модель, построенная на основе инженерно-геологического разреза, в неполной мере будет соответствовать трехмерной модели, построенной на базе интерполяционных методов.

Процесс верификации поверхностей и их сопоставление с инженерно-геологическими разрезами многократно улучшает качество геолого-структурной модели. Именно верификация объемных тел с инженерно-геологическими разрезами позволяет отобразить характерную для природных геологических тел пространственную прерывистость (рис. 7). Следует отметить, что прерывистость геологических тел, и, следовательно, их пространственная неоднородность является одним из критериев необходимости применения трехмерного (3D) моделирования.

Для более детального сравнительного анализа напряженного состояния в западной части объемной модели в соответствии с инженерно-геологическим разрезом (см. рис. 2) представлена линза песчаных грунтов внутри моренных отложений московского горизонта (рис. 8).

Создание трехмерной конечно-элементной модели в программном комплексе MIDAS GTS NX основано на построении геометрической (геолого-структурной) модели в плоскостях X-Y-Z глобальной системы координат. Геолого-структурная (геометрическая) модель в среде MIDAS GTS NX создается с акцентом на минимизацию ошибок, препятствующих построению конечно-элементной модели. Ограничения, которые возникают при моделировании, в основном связаны с используемым программным комплексом. В ПК MIDAS GTS NX к таким ограничениям относятся: присутствие в модели гладких кривых (поверхностей, тел и т.д.); наличие пересекаемых в пространстве объемных тел; появление при моделировании тонких (мощность <10 мм) тел (прослоек); отсут-

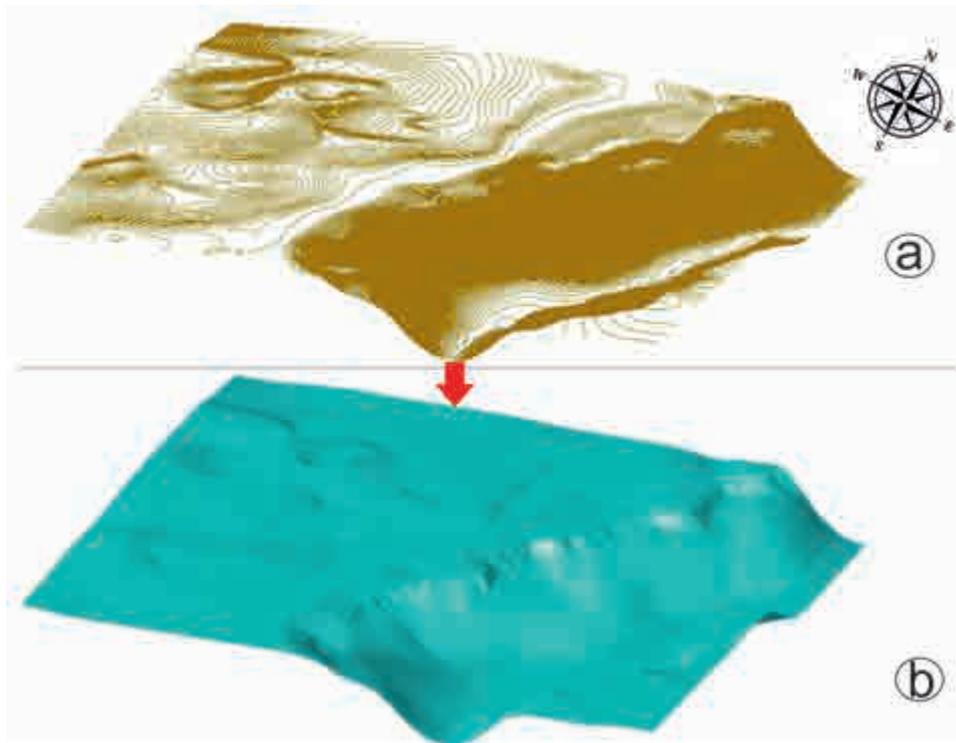


Рис. 6. Процесс построения и обработки цифровых (матриц) поверхностей геологических тел: а — верифицированные изолинии подошвы московской морены и палеодолины р. Куны; б — поверхность подошвы московской морены и палеодолины р. Куны, построенная инструментом Terrain Geometry Maker в ПК MIDAS GTS NX

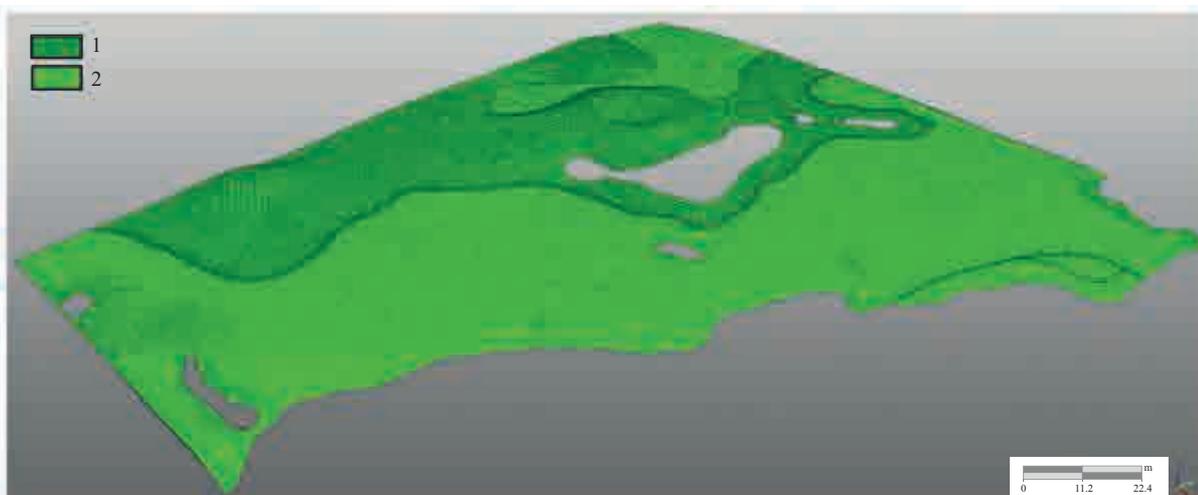


Рис. 7. Объемные пространственно-прерывистые геологическое тела: 1 — сантонские глины зоны II ( $dp^2QII(K_2, st)$ ); 2 — сантонские глины зоны III ( $dp^3QII(K_2, st)$ )

ствие единой для двух соприкасающихся тел границы и наличие многочисленных границ (линий) на поверхности объемного тела.

Сетки конечных элементов в программе MIDAS GTS NX имеют разные геометрические формы. В рассматриваемой работе для решения трехмерной задачи при дискретизации геометрической (геолого-структурной) модели использовались изопараметрические элементы в виде четырехузловых тетраэдров (рис. 9) различных размеров. Конструирование пространственной сетки конечных элементов на основе геометрической модели весьма

трудоемкая задача, поэтому традиционно геометрическую область создают так, чтобы избежать резких неровностей и крайне тонких прослоек в геолого-структурной модели.

Размеры объемных (3D) конечных элементов, как и при двухмерном моделировании, выбирают исходя из степени сходимости конечно-элементной поверхности с поверхностью геомеханической схемы. Также критерием выбора размера конечного элемента служит минимальная мощность геологического слоя. Линейные размеры конечных элементов всегда должны быть меньше

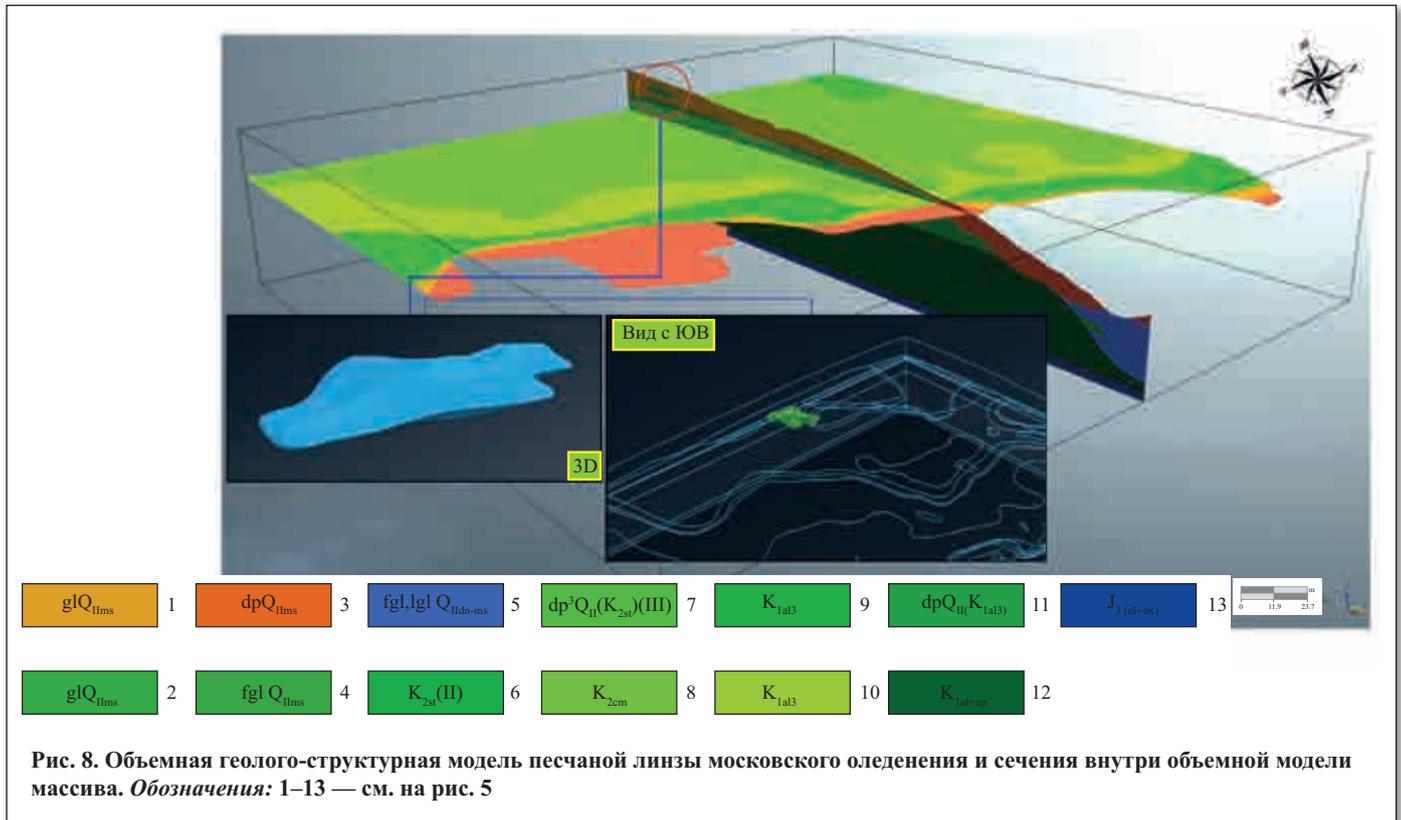


Рис. 8. Объемная геолого-структурная модель песчаной линзы московского оледенения и сечения внутри объемной модели массива. Обозначения: 1–13 — см. на рис. 5

«мощности» геологического слоя (области дискретизации) (рис. 10).

Ключевым моментом при моделировании НДС является назначение граничных условий. Граничные условия в напряжениях вытекают из условия равновесия элементов модели, выходящих какой-либо своей частью на поверхность. Соответственно, такой элемент должен находиться в равновесии (т.е. дифференциальные уравнения равновесия должны выполняться в любой внутренней точке тела) с одной стороны, под действием определяемых внутренних сил (напряжений), а с другой — под действием внешних заданных сил [2, 6]. Исходя из этого, в условиях воздействия на модель только гравитационной силы, граничные условия построенной модели задавались следующим образом (рис. 11). Верхняя граница свободна от напряжений. Нижняя граница удалена так, что не оказывает влияния на решение задачи, поэтому она задается фиксированной с нулевыми значениями перемещений. Боковые границы не испытывают влияния внешних факторов, вызывающих перераспределение напряжений, поэтому точки, расположенные на боковых границах, не будут перемещаться в горизонтальном направлении. Ввиду того, что моделируемая область находится под действием гравитационной силы, она должна иметь возможность свободно деформироваться в вертикальном направлении. Следовательно, вдоль ее боковой границы должно отсутствовать трение, что эквивалентно заданию нулевого касательного напряжения. Также в качестве граничных условий в модели задается статическая нагрузка от собственного веса, как направление вектора гравитации.

При трехмерном (3D) моделировании НДС, линейные размеры расчетной области (грунтового массива) составили (по оси X = 906 м; по оси Y = 950 м; по оси Z = 195 м), минимальная мощность слоя — 1 м равнялась минимальному шагу дискретизации 3D модели.

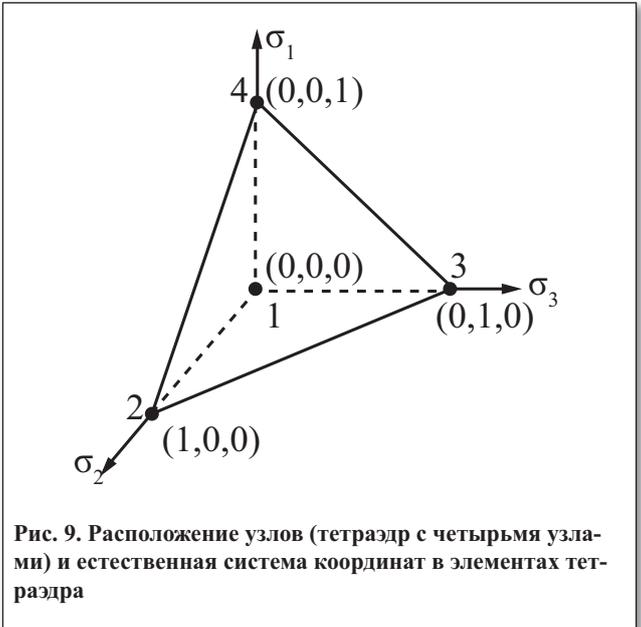


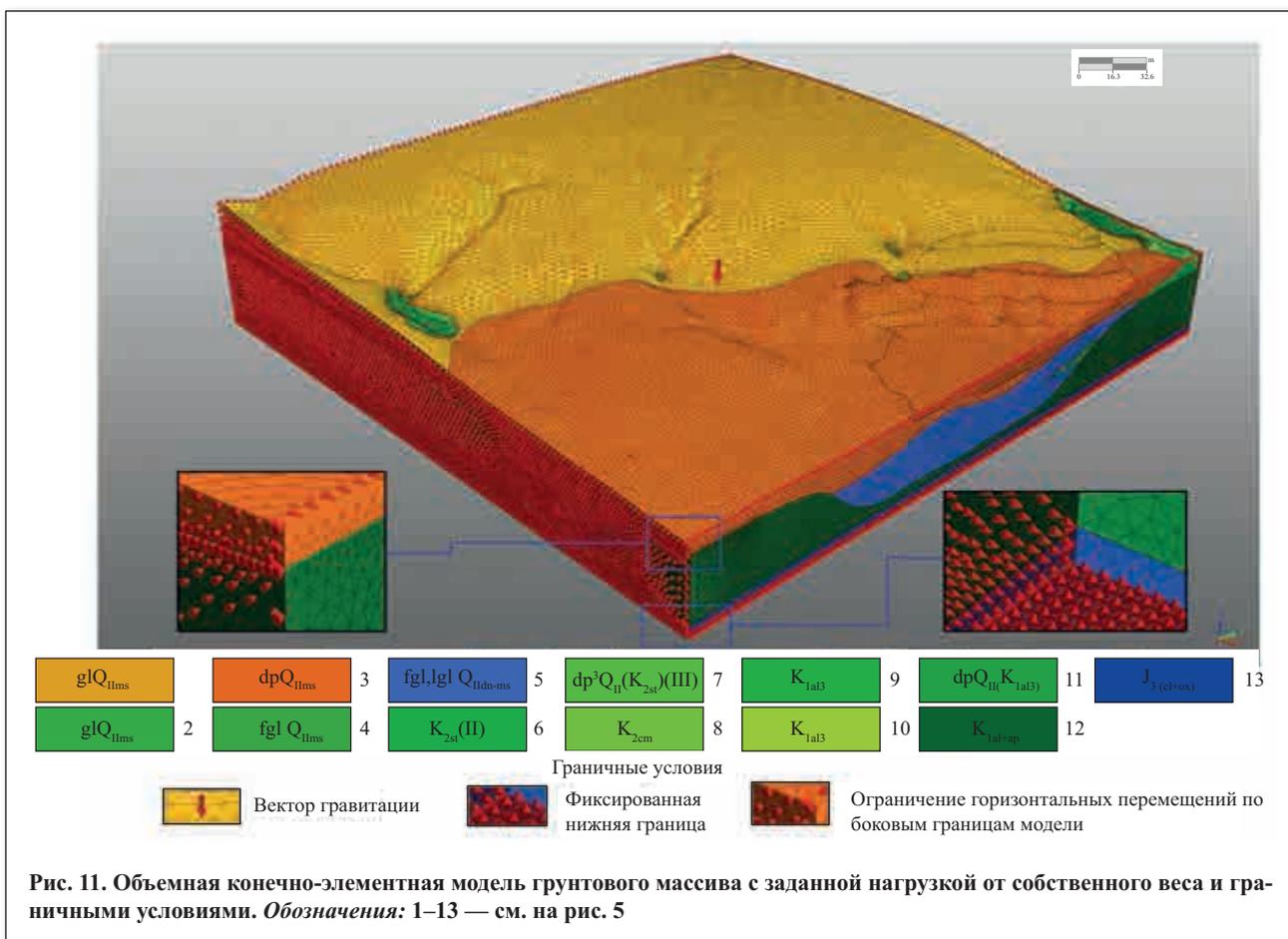
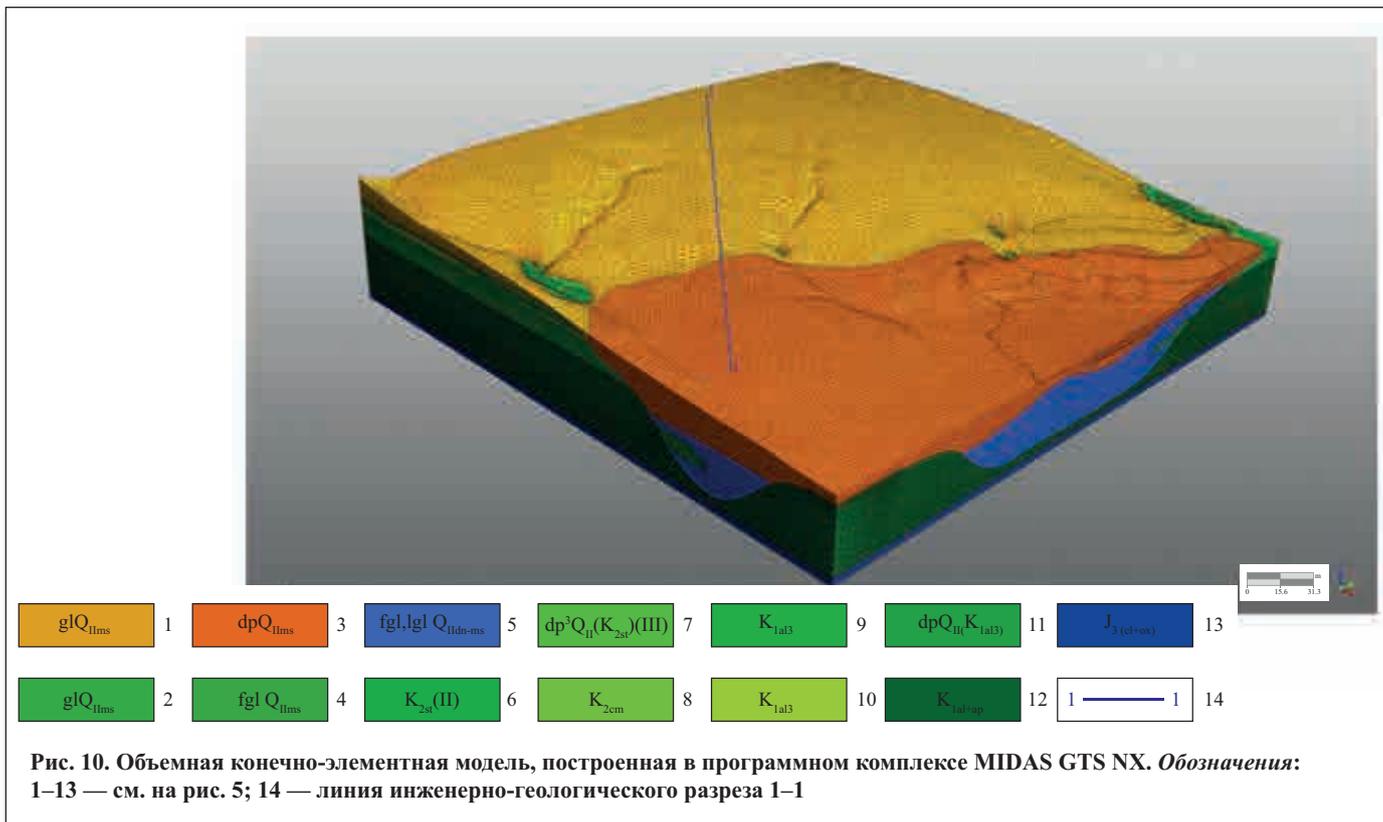
Рис. 9. Расположение узлов (тетраэдр с четырьмя узлами) и естественная система координат в элементах тетраэдра

**Сравнительный анализ величин НДС, полученных при двухмерном и трехмерном моделировании**

Анализ НДС дисперсного массива показывает, что отличие объемного моделирования (решения объемной задачи) от плоского состоит не только в трудоемкости первого, но и в различии между получаемыми величинами при расчетах НДС.

В настоящее время довольно остро стоит вопрос о соотношениях величин напряжений при двухмерных и трехмерных расчетах. Интерес к данному вопросу в первую очередь определяется необходимостью перехода к цифровой передаче информации, в частности данных при инженерных изысканиях.

С целью детального сравнительного анализа характера распределения и величин напряжений в двухмерной



и трехмерной постановках, в структуре объемной модели (см. рис. 10) было построено сечение А–А, которое соответствует направлению и плановому координатному расположению инженерно-геологического разреза 1–1 (см. рис. 2).

Распределение вертикальных ( $\sigma_y$ ) и касательных ( $\tau_{xy}$ ) напряжений в неоднородном грунтовом массиве, полученное по результатам двухмерного моделирования (2D), представлено на рис. 12 и 13. Распределение вертикальных напряжений в 2D модели отражает четкую зависимость величин

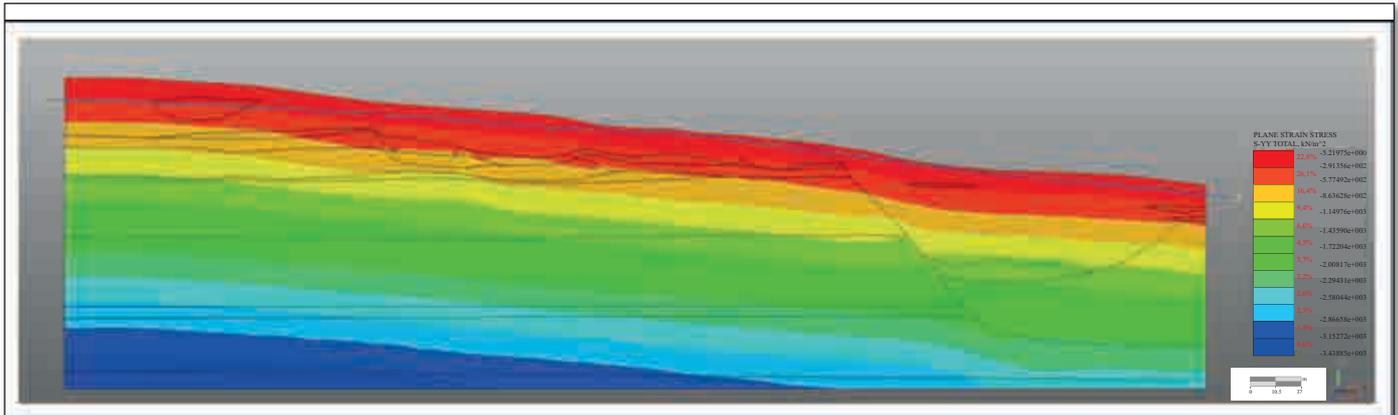


Рис. 12. Распределение вертикальных напряжений  $\sigma_y$  по расчетной схеме 1–1, полученные в 2D постановке. Обозначения: красный — минимальные сжимающие напряжения (растягивающие, если они имеют место); темно-синий — максимальные сжимающие напряжения в массиве

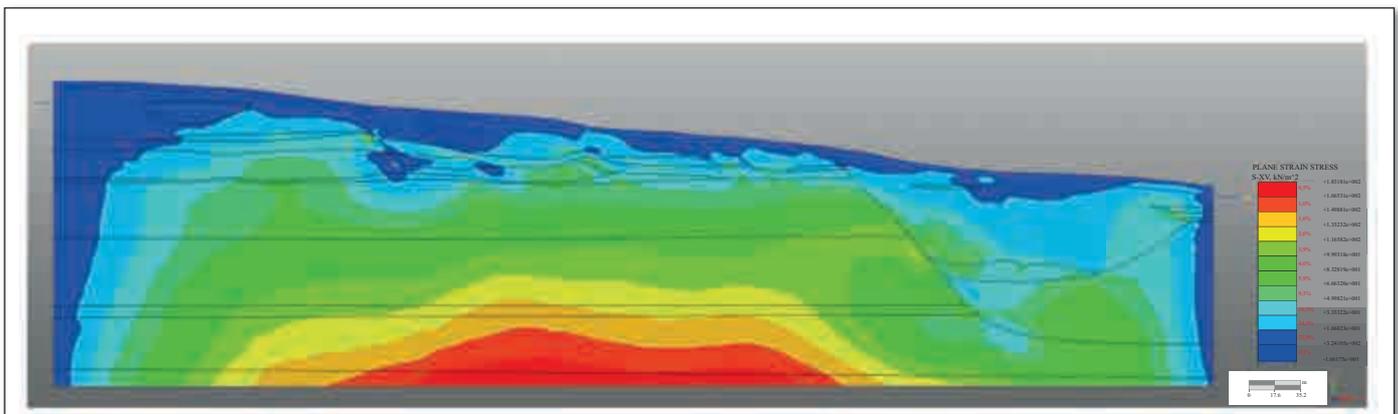


Рис. 13. Распределение касательных напряжений  $\tau_{xy}$  по расчетной схеме 1–1, полученное в 2D постановке

рассматриваемых напряжений от изменения деформационных свойств (модуля упругости) грунтов массива. Установленный двухмерным моделированием характер поля напряжений в исследуемом неоднородном грунтовом массиве позволил обнаружить участки, в которых проявляются незначительные неоднородности распределения вертикальных напряжений. В верхней части моделируемой области наблюдается высокая зависимость поля вертикальных напряжений от расчлененности рельефа и структурных неоднородностей массива. В местах, где соприкасаются геологические слои с различными деформационными характеристиками, отмечается незначительное увеличение или уменьшение напряжений. В целом форма изополей вертикальных напряжений закономерно повторяет конфигурацию верхней границы модели (рельефа грунтового массива) вплоть до нижней границы моделируемой области.

Касательные напряжения в верхней части массива распределяются неоднородно. Их форма и структура подчиняется литологическим неоднородностям и особенностям рельефа массива в данной области. В местах контактов геологических слоев, имеющих различные деформационные свойства, отмечаются зоны концентрации касательных напряжений. В общей структуре поля касательных напряжений рассматриваемые зоны хорошо выражены. Зоны концентрации напряжений преимущественно приурочены к относительно слабым грунтам массива (сантонские глины II и III зоны, см. рис. 13).

Величины вертикальных напряжений практически совпадают с геостатическим напряжением. Максимальная величина вертикальных напряжений (3 438 кПа) в исследуемом массиве приурочена к нижней границе модели. Соответственно, минимальная величина приурочена к верхней части массива. На абсолютной отметке 220 м величина вертикальных напряжений в западной (водораздельной) части массива достигает 291 кПа (см. рис. 12). Величины касательных напряжений имеют незакономерный характер распределения. Максимальная величина данных напряжений (183 кПа) приурочена к нижней части исследуемого массива. Минимальные величины касательных напряжений (0,032 кПа) приурочены к приповерхностной части массива. В зонах концентрации напряжений величины касательных напряжений доходят до 116 кПа. Наиболее представительная зона концентрации приурочена к контактам флювиогляциальных песков московского оледенения с сантонскими оползневыми глинами (II и III зоны, см. рис. 13).

Анализ НДС грунтового массива в трехмерной постановке (3D) показывает, что характер распределения вертикальных напряжений так же, как и при двухмерном моделировании, отражают четкую дифференциацию их величин в зависимости от физико-механических свойств грунтов массива (модуля упругости) (рис. 14 и 15). При этом, несмотря на резкое различие физико-механических свойств двух контактирующих слоев с относительно ма-

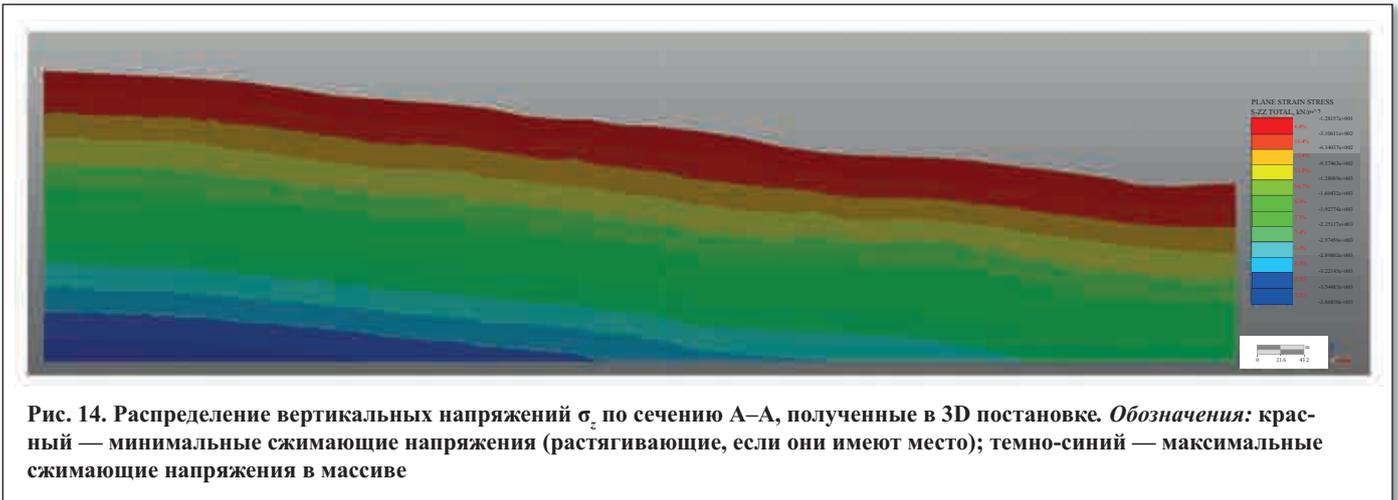


Рис. 14. Распределение вертикальных напряжений  $\sigma_z$  по сечению А–А, полученные в 3D постановке. Обозначения: красный — минимальные сжимающие напряжения (растягивающие, если они имеют место); темно-синий — максимальные сжимающие напряжения в массиве

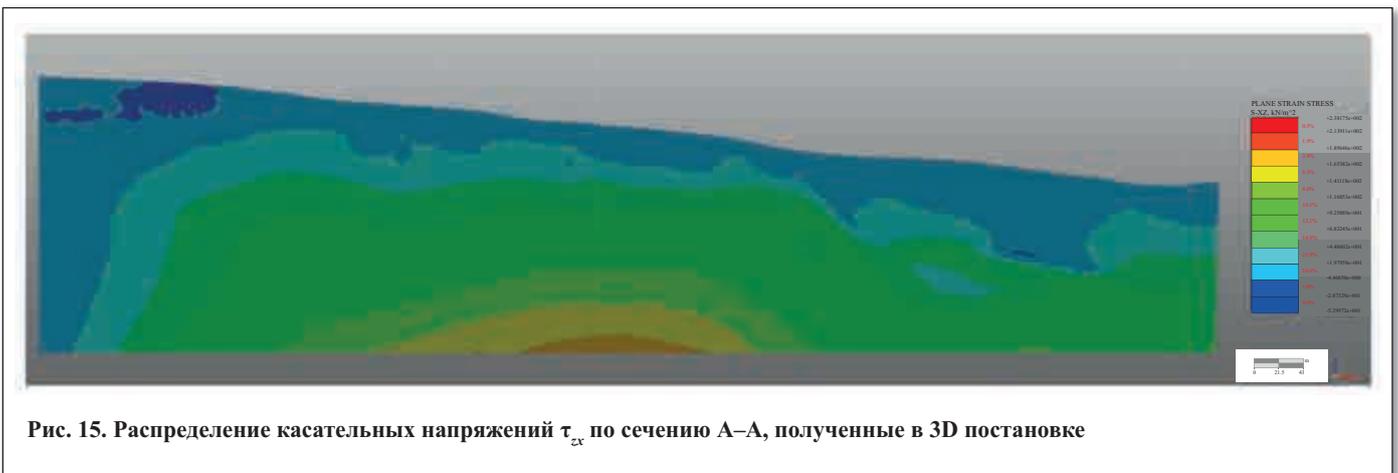


Рис. 15. Распределение касательных напряжений  $\tau_x$  по сечению А–А, полученные в 3D постановке

лыми мощностями, проявление неоднородностей напряжений в их пределах не прослеживается. Иными словами, происходит нивелирование изополей напряжений. Пространственная изменчивость изополей напряжений при трехмерном моделировании наблюдается достаточно ярко. Изополя напряжений в данном случае повторяют форму внутренних границ модели (рис. 16). Зоны концентрации напряжений внутри объемной модели почти не наблюдаются. Даже в потенциальных зонах развития концентрации напряжений весьма плохо прослеживается изменение конфигурации изополей вертикальных напряжений. Влияние локальных неоднородностей (линз) больших размеров (см. рис. 15) при трехмерном моделировании на напряженное состояние проявляется весьма сильно.

Из анализа становится очевидно, что локальные неоднородности относительно малых размеров не влияют на общий фон напряженного состояния массива. Вертикальные напряжения в верхней части массива распределяются однородно. Влияние расчлененности рельефа на характер распределения вертикальных напряжений в верхней части массива не проявляется. Изополя напряжений по всему массиву повторяют форму верхней границы трехмерной модели. В целом по всему массиву характер распределения вертикальных напряжений хорошо соотносится с геостатическим. Это связано с тем, что преимущественно в геологическом разрезе показатели деформационных характеристик каждого перекрывающего слоя относительно меньше подстилающего. Следовательно, полученная картина повторяет геостатическое распределение напряжений.

Анализ величин и характера распределения касательных напряжений в объемной постановке (3D) показывает их слабую зависимость от неоднородности геологического строения грунтового массива. Влияние на распределение касательных напряжений локальных неоднородностей и мало мощных геологических слоев почти не прослеживается. При детальном анализе можно наблюдать только относительно интегрированную картину изменения величин касательных напряжений, обусловленных геологическим строением массива. Исключением является влияние песчаной линзы (см. рис. 15) на распределение касательных напряжений.

Величины вертикальных напряжений, как уже было отмечено, близки к геостатическим. Максимальная величина вертикальных напряжений (3868 кПа) в исследуемом массиве приурочена к его нижней границе. Минимальная величина приурочена к верхней части массива. На абсолютной отметке 220 м максимальная величина вертикальных напряжений в западной (водораздельной) части массива достигает 310 кПа (см. рис. 14). Величины касательных напряжений распределяются не закономерно. Максимальная величина данных напряжений (189 кПа) приурочена к нижней части исследуемого массива. В верхней части массива максимальные касательные напряжения имеют величину (–4,5 кПа), которые для всего массива являются минимальными (см. рис. 15).

Согласно проведенному анализу НДС грунтового массива в двухмерной и трехмерной постановках, можно отметить следующее.

Особенности структур изополей вертикальных, горизонтальных и касательных напряжений лучше всего про-

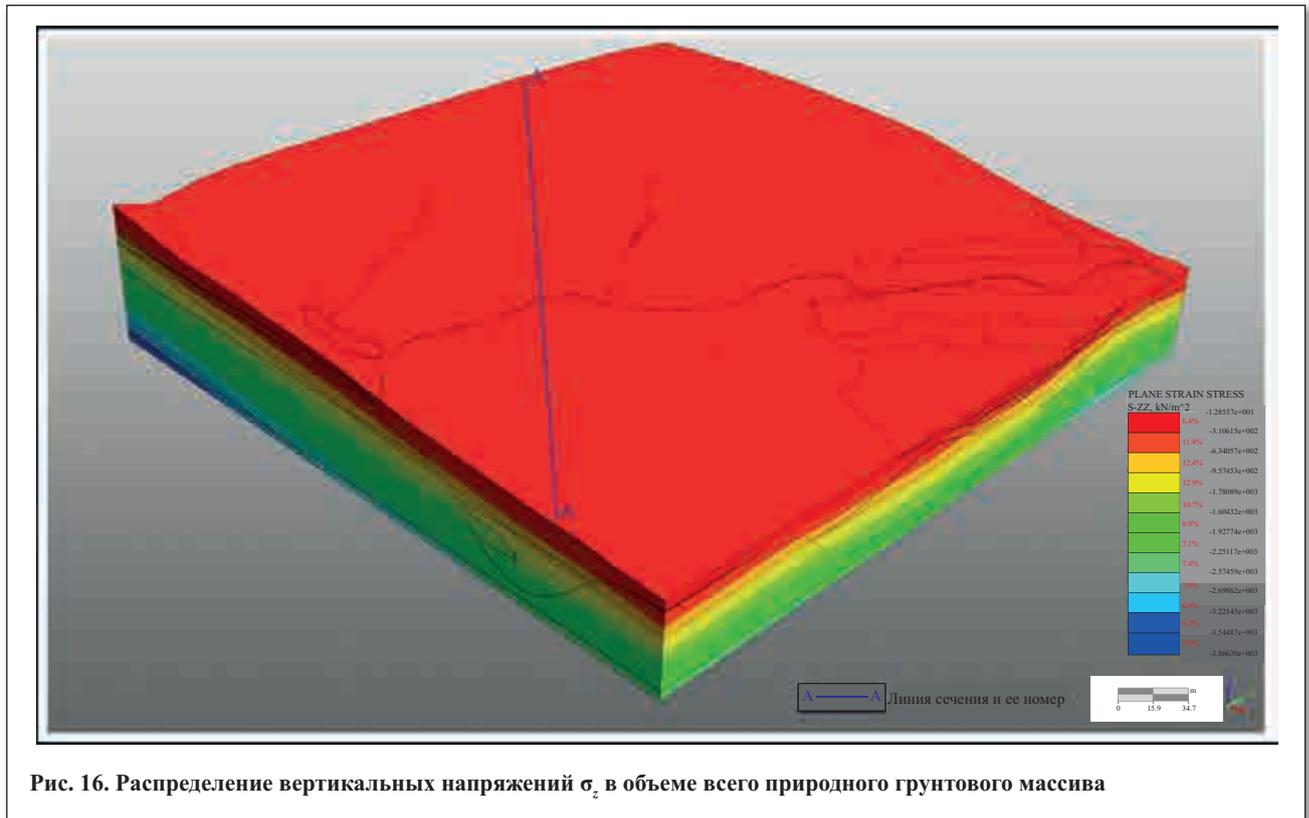


Рис. 16. Распределение вертикальных напряжений  $\sigma_z$  в объеме всего природного грунтового массива

являются в двухмерной постановке. Анализ распределения напряжений на различных абсолютных отметках массива удобнее проводить на основе двухмерной модели. Для детальной оценки влияния расчлененности рельефа и неоднородности строения верхней части грунтового массива на НДС рекомендуется провести расчет НДС в двухмерной постановке. Зоны концентрации напряжений весьма детально проявляются в двухмерной постановке. В трехмерной постановке зоны концентрации, приуроченные к геологическим телам незначительных размеров, выражаются очень слабо. Для оценки влияния пространственной неоднородности грунтового массива на НДС рекомендуется провести расчет НДС в трехмерной постановке, так как в двухмерной постановке учет пространственной неоднородности достаточно сложен. При наличии в грунтовом массиве геологических тел, имеющих прерывистое пространственное распространение, также необходимо прибегнуть к расчету и анализу напряженного состояния в трехмерной постановке. В отличие от результатов, полученных объемным моделированием, по результатам двухмерного моделирования можно проанализировать влияние неоднородности на распределение вертикальных напряжений по всему массиву. Такие неоднородности при трехмерном моделировании почти не проявляются. Характер распределения касательных напряжений в двухмерной постановке сильно отличается от трехмерной. При трехмерном моделировании зоны концентрации касательных напряжений совершенно не проявляются.

Кроме структурных особенностей изополей напряжений, немаловажным является факт о несовпадении величин одноименных напряжений, полученных при моделировании НДС в двухмерной и трехмерной постановках. Из проведенного анализа следует, что величины вертикальных напряжений, полученные при двухмерном моделировании, на 430 кПа ниже максимальных величин

одноименных напряжений, полученных в трехмерной постановке. Величины вертикальных напряжений в верхней части массива (до глубин 12–15 м от поверхности массива), полученные посредством трехмерного моделирования, в среднем на 10–15% больше величин одноименных напряжений, полученных при двухмерном моделировании. Величины касательных напряжений в двухмерной постановке имеют удовлетворительную сходимость с величинами, полученными в результате объемного моделирования. Максимальные величины касательных напряжений, полученные в обеих постановках, находятся в пределах от 183 до 189 кПа.

### Выводы и рекомендации

Сравнительный анализ результатов, полученных на основе плоского и объемного моделирования НДС грунтового массива, позволяет авторам сделать следующие выводы:

1. Характер и форма распределения изополей вертикальных напряжений при решении задачи о НДС в плоской и объемной постановках остаются практически одинаковыми и соответствуют конфигурации склона. Это объясняется тем, что в обеих постановках, заложенные в них геометрические модели весьма схожи по своим внутренним и внешним границам, а также имеют одинаковые свойства, которые изменяются по всему массиву закономерно. Исключением являются зоны неоднородного распределения вертикальных напряжений, обусловленные литолого-петрографическими особенностями массива, которые хорошо наблюдаются при решении плоской задачи о НДС грунтового массива. При объемном моделировании НДС в зонах литолого-петрографических неоднородностей массива происходит «нивелирование» изополей напряжений. Данный феномен строго зависит от фактических размеров геологических неоднородностей массива. Иными словами, при недостаточной мощности и простран-

- ственных размерах геологических тел, их влияние на общую структуру НДС проявляется весьма слабо, что объясняется используемым методом интерполяции величин напряжений в ПК Midas GTS NX, а также дискретизацией самой конечно-элементной сетки.
2. Величины вертикальных напряжений, полученные решением плоской задачи, всегда получаются ниже величин одноименных компонент НДС, полученных в объемной постановке. Величины касательных напряжений почти не зависят от пространственной постановки задачи. Различие в величинах всех компонент напряжений, получаемых расчетом, находится в пределах погрешности самого численного метода и теснейшим образом связано с дискретизацией конечно-элементной сетки.
  3. НДС верхней части грунтового массива в рамках объемного моделирования описывается крайне неудовлетворительно, что связано как с ограничениями программного комплекса, так и с особенностями численного метода и методики дискретизации инженерно-геологической модели в ее верхней части. В связи этим, зоны концентрации напряжений при объемном моделировании проявляются очень слабо. При двухмерном моделировании в верхней части массива четко наблюдается влияние степени расчлененности рельефа и неоднородности строения массива на характер распределения напряжений и НДС в целом. Также в отличие от объемной постановки, при двухмерном моделировании намного лучше наблюдаются зоны концентрации, приуроченные к контактным участкам геологических тел (слоев) с различными деформационными свойствами. Это объясняется тем, что при дискретизации локальных неоднородностей массива мы используем плоские конечные элементы, углы между гранями которых близки к 70–90°. Исходя из особенностей метода конечных элементов и учета влияния величин углов между гранями на конечный результат (чем ближе угол к 90°, тем меньше погрешность расчетов) в ПК Midas GTS NX, мы получим максимальную точность величин и детализацию изополей напряжений в двухмерной постановке.
  4. При наличии в исследуемом грунтовом массиве пространственно-неоднородных и прерывистых геологических тел оценку его НДС рекомендуется произвести в трехмерной постановке. Для детального анализа НДС в верхней части массива, а также влияния на него локальных структурных неоднородностей массива, маломощных геологических слоев рекомендуется провести оценку и анализ в плоской постановке. 

## СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Аргирис, Дж., 1965. Матричный анализ малых и больших перемещений в трехмерных упругих средах. Ракетная техника и космонавтика, № 1, с. 177–186.
2. Бате, К., Вилсон, Е., 1982. Численные методы анализа и метод конечных элементов. Стройиздат, М.
3. Бершов, А.В., 2015. О необходимости перехода в инженерно-геологических и инженерно-геотехнических изысканиях к трехмерному (3D) моделированию и представлению материалов. Перспективы развития инженерных изысканий в строительстве Российской Федерации, Материалы Одиннадцатой Общероссийской конференции изыскательских организаций, Москва, 2015, с. 75–79.
4. Барыкина, О.С., Калинин, Э.В., 2012. Использование метода граничных элементов для оценки зоны динамического влияния разлома. Геология, география и глобальная энергия, № 2, с. 81–85.
5. Газиев, Э.Г., 1977. Устойчивость скальных массивов и методы их закрепления. Стройиздат, М.
6. Галлагер, Р., 1984. Метод конечного элемента. Основы. Мир, М.
7. Ержанов, Ж.С., Каримбаев, Т.Д., 1975. Метод конечных элементов в задачах механики горных пород. Наука, Алма-Ата.
8. Зенкевич, О., Чанг, И., 1974. Метод конечных элементов в теории сооружений и в механике сплошных сред. Недра, М.
9. Зенкевич, О., 1975. Метод конечных элементов в технике. Мир, М.
10. Золотарев, Г.С., Максимов, С.Н., 1968. Изучение напряженного состояния массивов горных пород в инженерно-геологических целях. МГУ, М.
11. Калинин, Э.В., Панасьян, Л.Л., Широков, В.Н., Артамонова, Н.Б., Фоменко, И.К., 2003. Моделирование полей напряжений в инженерно-геологических массивах. МГУ, М.
12. Калинин, Э.В., Панасьян, Л.Л., Тимофеев, Е.М., 2008. Новый подход к расчету устойчивости оползневых склонов. Вест. Моск. Ун-та. Сер. 4. Геология, № 1, с. 21–29.
13. Калинин, Э.В., Панасьян, Л.Л., 2015. Методические аспекты создания геомodelей при разработке месторождений полезных ископаемых. Геотехника, № 2, с. 51–57.
14. Калинин, Э.В., Панасьян, Л.Л., Зеркаль, О.В., 2004. Изменение напряженно-деформированного состояния массивов горных пород при прохождении сейсмических волн. Геоэкология. Инженерная геология. Гидрогеология. Геокриология, № 3, с. 265–272.
15. Калинин, Э.В., Панасьян, Л.Л., Артамонова, Н.Б., 2006. Методика исследований при оценке инженерно-геологических условий нефтяных и газовых месторождений. Инженерная геология, № 11, с. 51–57.
16. Калинин, Э.В., Шешенин, С.В., Кузь, И.С., 1991. Напряженное состояние анизотропных массивов горных пород. Инженерная геология, № 1, с. 35–43.
17. Миронов, А.В., 2013. Философия социо(техно)-природной системы. МАКС Пресс, М.
18. Панасьян, Л.Л., Фролова, Ю.В., Шанина, В.В., 2016. О возможном распределении напряжений в породах гидротермальных систем. Инженерная геология, № 6, с. 38–47.
19. Слышкина, Е.С., Баранов, А.А., Бершов, А.В., 2015. Расчет устойчивости северных склонов хребта Аибга в районе поселка Эсто-Садок (Красная Поляна). Инженерная геология, № 6, с. 4–15.

20. Слышкина, Е.С., Бершов, А.В., Баранов, А.А., Сас, И.Е., Гаврилов, А.В., 2016. Современная активность оползней южного склона хребта Псежако в бассейне реки Мзымта (Северо-Западный Кавказ). Инженерная геология, № 3, с. 16–29.
21. Терцаги, К., Пек, Р., 1958. Механика грунтов в инженерной практике // Гостройиздат, М.
22. Фадеев, А.Б., 1987. Метод конечных элементов в геомеханике. Недра, М.
23. Шашкин, А.Г., 2011. Вязко-упруго-пластическая модель поведения глинистого грунта. Развитие городов и геотехническое строительство, № 2, с. 32.
24. Zienkiewicz, O.C., 1971. The finite element method in Engineering Science. Me Graw-Hill, London.
25. Bing Maps. URL: <https://www.bing.com/maps/> (Дата обращения: 01.12.17).

## REFERENCES

1. Argiris Dzh., 1965. Matrix analysis of large and minor displacements in three-dimensional elastic medium. Raketnaia tekhnika i kosmonavtika, no. 1, pp. 177–186. (In Russ.).
2. Bate, K., Vilson, E., 1982. Numerical methods and finite element analysis. Stroiizdat, Moscow. (In Russ.).
3. Bershov, A.V., 2015. On the necessity of moving to three-dimensional modeling and results presentation in engineering survey. Prospects for development of engineering survey in Russian Federation, Materials of the 11th All-Russian Conference of prospecting organizations, Moscow, 2015, pp. 75–79. (In Russ.).
4. Barykina, O.S., Kalinin, E.V., 2012. Border elements method usage for a crack dynamic influence calculation. Geology, geography and global energy, no. 2, pp. 81–85. (In Russ.).
5. Gaziev, E.G., 1977. Rock massif stability and methods of reinforcement. Stroiizdat, Moscow. (In Russ.).
6. Gallager, R., 1984. Finite element method. Basics. Mir, M. (In Russ.).
7. Erzhanov, Zh.S., Karimbaev, T.D., 1975. Finite element method in rock soil mechanics. Nauka, Alma-Ata. (In Russ.).
8. Zenkevich, O., Chang, I., 1974. Finite element method in structural theory and solid medium mechanics. Nedra, M. (In Russ.).
9. Zenkevich, O., 1975. Finite element method in technics. Mir, Moscow. (In Russ.).
10. Zolotarev, G.S., Maksimov, S.N., 1968. Soil massif stress state studies for engineering geology. MSU, Moscow. (In Russ.).
11. Kalinin, E.V., Panasian, L.L., Shirokov, V.N., Artamonova, N.B., Fomenko, I.K., 2003. Stress fields modeling in engineering-geological massif. MSU, Moscow. (In Russ.).
12. Kalinin, E.V., Panasian, L.L., Timofeev, E.M., 2008. New approach for slope stability calculation. Vestnik Moskovskogo Universiteta. Seria 4. Geologiya, no. 1, pp. 21–29. (In Russ.).
13. Kalinin, E.V., Panasian, L.L., 2015. Methodical part of creating geomodel for mining of mineral resources. Geotechnics, no. 2, pp. 51–57. (In Russ.).
14. Kalinin, E.V., Panasian, L.L., Zerkal, O.V., 2004. Soil massif stress-strain state change under the seismic waves. Geoecology. Engineering geology. Hydrogeology. Geocriology, no. 3, pp. 265–272. (In Russ.).
15. Kalinin, E.V., Panasian, L.L., Artamonova, N.B., 2006. Survey method for oil and gas fields engineering-geological conditions estimation. Engineering geology, no. 11, pp. 51–57. (In Russ.).
16. Kalinin, E.V., Sheshenin, S.V., Kuz, I.S., 1991. Stress state of anisotropic soil. Engineering geology, no. 1, pp. 35–43. (In Russ.).
17. Mironov, A.V., 2013. Philosophy of socio(techno)-natural system. MAKS Press, Moscow. (In Russ.).
18. Panasian, L.L., Frolova, Iu.V., Shanina, V.V., 2016. On the possible stress-strain distribution pattern within the hydrothermally altered rocks. Engineering geology, no. 6, pp. 38–47. (In Russ.).
19. Slyshkina, E.S., Baranov, A.A., Bershov, A.V., 2015. Stability calculation of the northern slope of the Aibga ridge near the Esto-Sadok village (Sochi, the Krasnodar Territory). Engineering geology, no. 6, pp. 4–15. (In Russ.).
20. Slyshkina, E.S., Bershov, A.V., Baranov, A.A., Sas, I.E., Gavrilov, A.V., 2016. Modern activity of landslides on the southern slope of the Psekhako ridge in the Mzymta river basin (the North-West Caucasus). Engineering geology, no. 3, pp. 16–29. (In Russ.).
21. Tertsagi, K., Pek, R., 1958. Soil mechanics in engineering practice. Gostroiizdat, Moscow. (In Russ.).
22. Fadeev, A.B., 1987. Finite element method in geomechanics. Nedra, Moscow. (In Russ.).
23. Shashkin, A.G., 2011. Visco-elasto-plastic model of clay soil. Razvitie gorodov i geotekhnicheskoe stroitelstvo, no. 2, p. 32. (In Russ.).
24. Zienkiewicz, O.C., 1971. The Finite Element Method in Engineering Science. Me Graw-Hill, London.
25. Bing Maps. URL: <https://www.bing.com/maps/> (Accessed 1 December 2017).

## CAPTIONS TO FIGURES

Fig. 1. Space image fragment of the study area, based on “Bing Maps” [25]. *Designations:* 1 — study area; 2 — modeled area; 3 — rivers

Fig. 2. Engineering-geological section (1–1) of the study soil massif. *Designations:* 1 — moraine loam; 2 — sand of different graininess; 3 — fine sand; 4 — clay; 5 — ground water level; 6 — lithological boundaries; 7 — stratigraphic boundaries

Fig. 3. Limiting surface of Mohr-Coulomb criterion

Fig. 4. Coordinate system indicating positive direction of stress components

Fig. 5. Two-dimensional finite-element model in MIDAS GTS NX software. *Designations:* 1 — loamy formations of Moscow Glaciation moraine (EGE-5); 2 — sands of Moscow moraine (EGE-6); 3 — deployed moraine (EGE-7); 4 — fluvio-glacial deposits of the Moscow horizon represented by sandy deposits (EGE-8); 5 — Dnieper-Moscow fluvio-glacial and limnoglacial deposits represented by sandy deposits (EGE-9); 6 — sediments of the Santonian stage, represented by clays (*zone II*) (EGE-10); 7 — offset sediments of Santonian layer, presented clay (*zone III*) (EGE-12); 8 — Cenomanian sands (EGE-13); 9 — deposits of Albian layer (Paramonov clays) (EGE-14); 10 — upper Albian deposits, sands (EGE-14a); 11 — offset Paramonov deposits (EGE-15); 12 — undifferentiated Apt-Albian deposits (non-cohesive soils) (EGE-16); 13 — upper Jurassic deposits, clays (EGE-18); 14 — moraine water-bearing horizon

Fig. 6. Creation and processing of digital (matrix) surfaces of geological bodies: a — verified contours of Moscow moraine and river Cunha paleovalley lower boundary; b — lower boundary surface of Moscow moraine and river Cunha paleovalley, modeled with Terrain Geometry Maker tool in PC MIDAS GTS NX software

Fig. 7. Three-dimensional spatially-discontinuous geological bodies: 1 — Santonian clays of the *zone II* ( $dp^2QII(K_2st)$ ); 2 — Santonian clays of the *zone III* ( $dp^3QII(K_2st)$ )

Fig. 8. Three-dimensional geological-structural model of Moscow glaciation sand lens and sections inside the massif model. *Designations:* 1–13 see fig. 5

Fig. 9. Nodes placement (four nodes tetrahedron) and natural coordinate system in tetrahedron elements

Fig. 10. Three-dimensional finite-element model, built in MIDAS GTS NX software. *Designations:* 1–13 see fig. 5; 14 — engineering-geological section line 1–1

Fig. 11. Three-dimensional finite-element model of soil massif with gravity loads and boundary conditions. *Designations:* 1–13 see fig. 5

Fig. 12. Vertical stress  $\sigma_y$  for design model 1–1 (two-dimensional problem). *Designations:* red — minimum compressing stress (tension, if present), dark-blue — maximum compression stress in massif

Fig. 13. Shear stress  $\tau_{xy}$  for design model 1–1 (two-dimensional problem)

Fig. 14. Vertical stress  $\sigma_z$  for section A–A (three-dimensional problem). *Designations:* red — minimum compressing stress (tension, if present), dark-blue — maximum compression stress in massif

Fig. 15. Shear stress  $\tau_{xz}$  for section A–A (three-dimensional problem)

Fig. 16. Vertical stress  $\sigma_z$  in the whole natural soil massif

## CAPTION TO TABLE

Table. Soil parameters of study massif for Mohr-Coulomb model used for calculation in MIDAS GTS NX software

### ИНФОРМАЦИЯ ОБ АВТОРАХ

#### ПАЙШАНБИЕВ С.А.

Аспирант кафедры инженерной и экологической геологии геологического факультета Московского государственного университета им. М.В. Ломоносова, г. Москва, Россия

#### КАЛИНИН Э.В.

Профессор кафедры инженерной и экологической геологии геологического факультета Московского государственного университета им. М.В. Ломоносова, д.г.-м.н., г. Москва, Россия

#### БЕРШОВ А.В.

Генеральный директор ООО «ПетроМоделинг», ассистент кафедры инженерной и экологической геологии геологического факультета Московского государственного университета им. М.В. Ломоносова, г. Москва, Россия

### INFORMATION ABOUT THE AUTHORS

#### PAISHANBIEV S.A.

Postgraduate student of the Department of Engineering and Ecological Geology, Faculty of Geology, Lomonosov Moscow State University, Moscow, Russia

#### KALININ E.V.

Professor of the Department of Engineering and Ecological Geology, Faculty of Geology, Lomonosov Moscow State University, DSc (Doctor of Science in Geology and Mineralogy), Moscow, Russia

#### BERSHOV A.V.

General director of the «PetroModeling» LTD, Assistant lecturer of the Department of Engineering and Ecological Geology, Faculty of Geology, Lomonosov Moscow State University, Moscow, Russia

[www.geomark.ru](http://www.geomark.ru)