

Методика трехмерного моделирования инженерно-геологических массивов

Бершов А.В., генеральный директор ГК ПЕТРОМОДЕЛИНГ
Преподаватель кафедры инженерной геологии Геологического факультета МГУ имени М.В. Ломоносова

Актуальность обусловлена следующими факторами:

1. Происходящий в стране, в строительной отрасли, переход к одновременному процессу, включающему строительство, проектирование и изыскания на базе цифровых информационных технологий, включающий в себя цифровые «двойники» объектов строительства и эксплуатации требует с одной стороны трехмерных моделей как сооружений, так и инженерно-геологических массивов (ИГМ), а с другой стороны быстрый и детальный обмен информацией между частями «двойников», в том числе и о основаниях сооружений и о окружающих их ИГМ.
2. Существующий подход к инженерно-геологическому моделированию на базе ИГЭ, выявляемых по ГОСТ 20522-2012, не позволяет перейти к пространственному моделированию и является строго двухмерным.
3. Принимая во внимание, что одной из теоретических задач инженерной геологии является выявление пространственных закономерностей ИГУ, связанных в том числе с инженерно-геологической иерархией инженерно-геологических тел (ИГТ), разработка методических основ трехмерного моделирования является максимально актуальной задачей.

Структура построения трёхмерной модели инженерно-геологического массива



Инженерно-геологический массив – иерархическая система геологических тел, выделяемых на разных геологических основаниях (возраст, структура, состав, состояние) с инженерно-геологической точки зрения для инженерно-хозяйственного освоения (реального или предполагаемого) и, при необходимости, с учетом этого освоения.

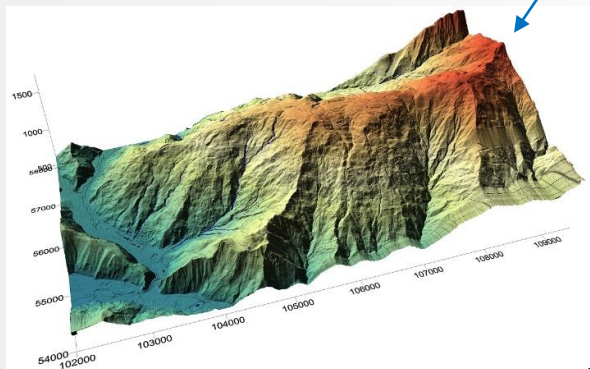
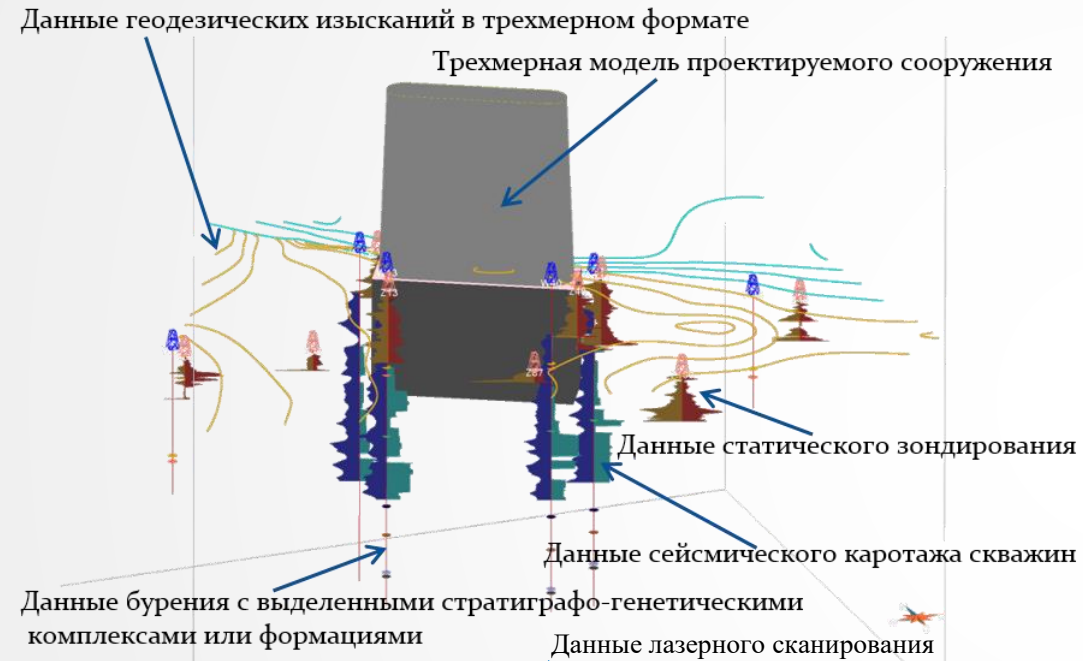
Основной принцип структурного моделирования (**этап 3**): выделение геологических тел от общего к частному внутри него согласно иерархии схематизации. Предлагается выделять следующие 3 уровня:

- 1. Пространственные инженерно-геологические тела 1 уровня (стратиграфо-генетические)** строятся геостатистическими методами по определенным стратиграфическим и генетическим маркерам и соответствуют общепринятым геологическим формациям и/или стратиграфо-генетическим комплексам с учетом форм рельефа, истории формирования и структурных взаимоотношений тел между собой;
- 2. Пространственные инженерно-геологические тела 2 уровня (литологические тела (монопородное тело 1 по Г.К.Бондарнику))**. Выделяются строго внутри стратиграфо-генетических тел. Данные тела строятся геостатистическими методами по определенным литологическим маркерам и/или на основе вариационного анализа с разбиением пространства инженерно-геологических тел 1 уровня на конечные элементы;
- 3. Пространственные инженерно-геологические тела 3 уровня (монопородное тело 2 уровня Г.К.Бондарнику)** выделяются внутри литологических тел по состоянию. Пространственное разделение инженерно-геологических тел 2 уровня по состоянию производится специфической группы маркеров (инженерно-геологических): водонасыщенности, температуры, трещиноватости, переуплотнения, степень сложенности, консистенции, мерзлотного состояния и т.д. ;
- 4 этап Пространственная изменчивость свойств** оцениваются в замкнутых объемах выделенных инженерно-геологических тел однородных по всем 3 признакам - стратиграфо-генетическому, литологическому и признаку состояния, при упрощении может задаваться как среднее значение

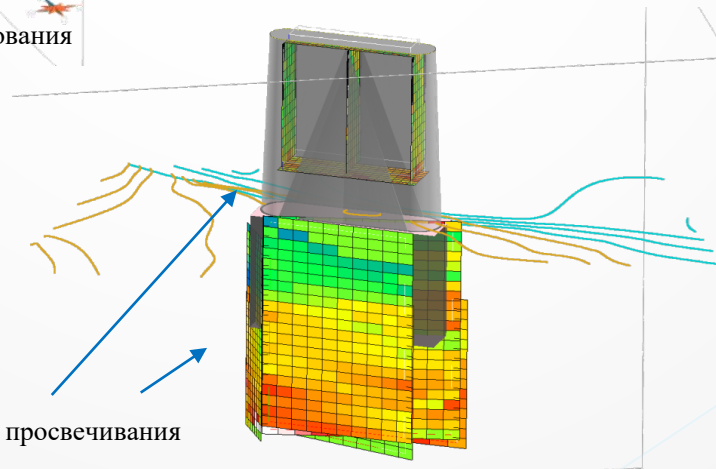
ИГ маркер – пространственно-временные отметки в виде точек, кривых или поверхностей, разграничивающие различные состояния геологических тел.

Трехмерное моделирование инженерно-геологического массива

Этап 1 Подбор исходных данных



Данные сейсмического просвечивания



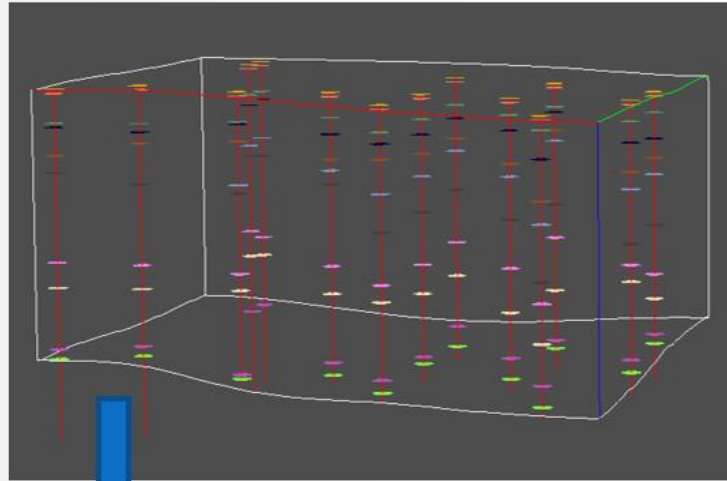
- Результаты топосъемки территории
- Результаты горнопроходческих работ
- Результаты полевых исследований (статического зондирования)
- Результаты геофизических работ
- Результаты лабораторных исследований
- Результаты обследования сооружений

Трёхмерное моделирование инженерно-геологического массива

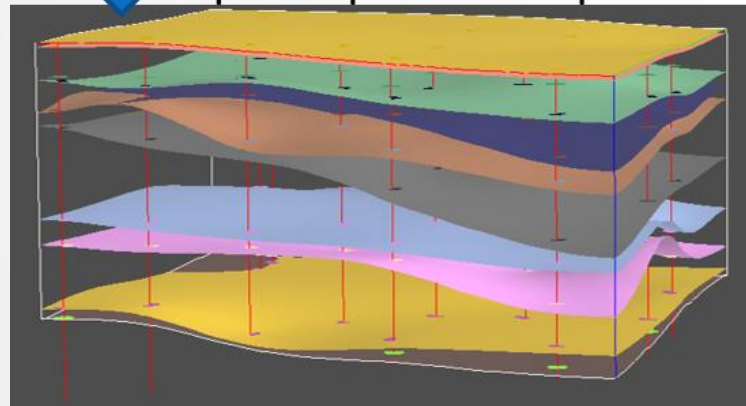
Этап 3. Структурное моделирование

Подэтап 3.1 Построение геолого-структурной модели

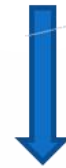
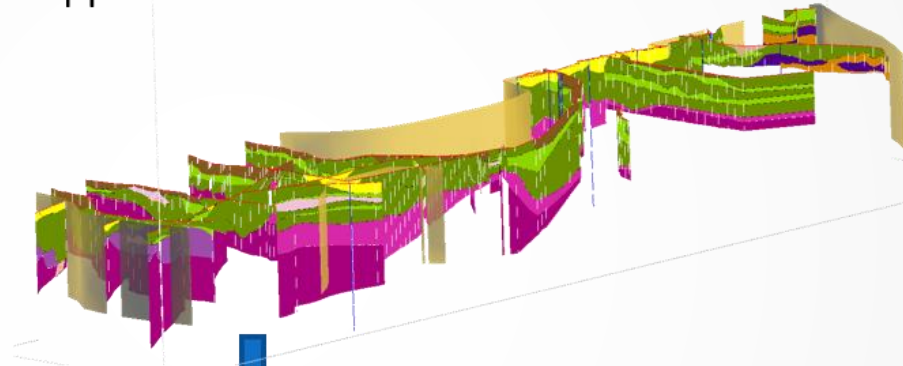
А) Данные бурения



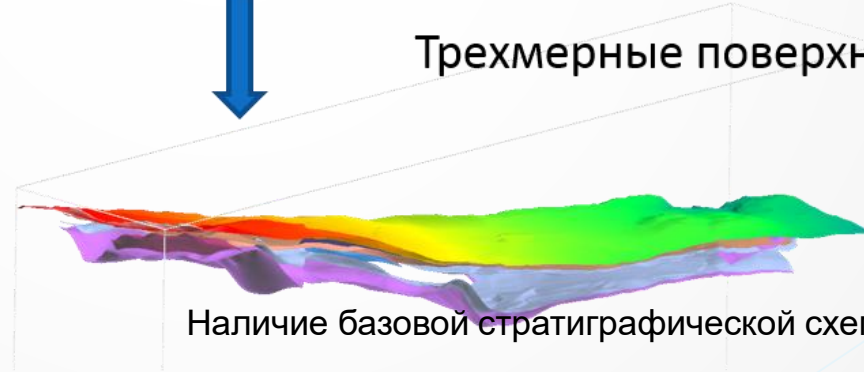
Трёхмерные поверхности



Б) Геолого-геофизическая модель



Трёхмерные поверхности



Наличие базовой стратиграфической схемы

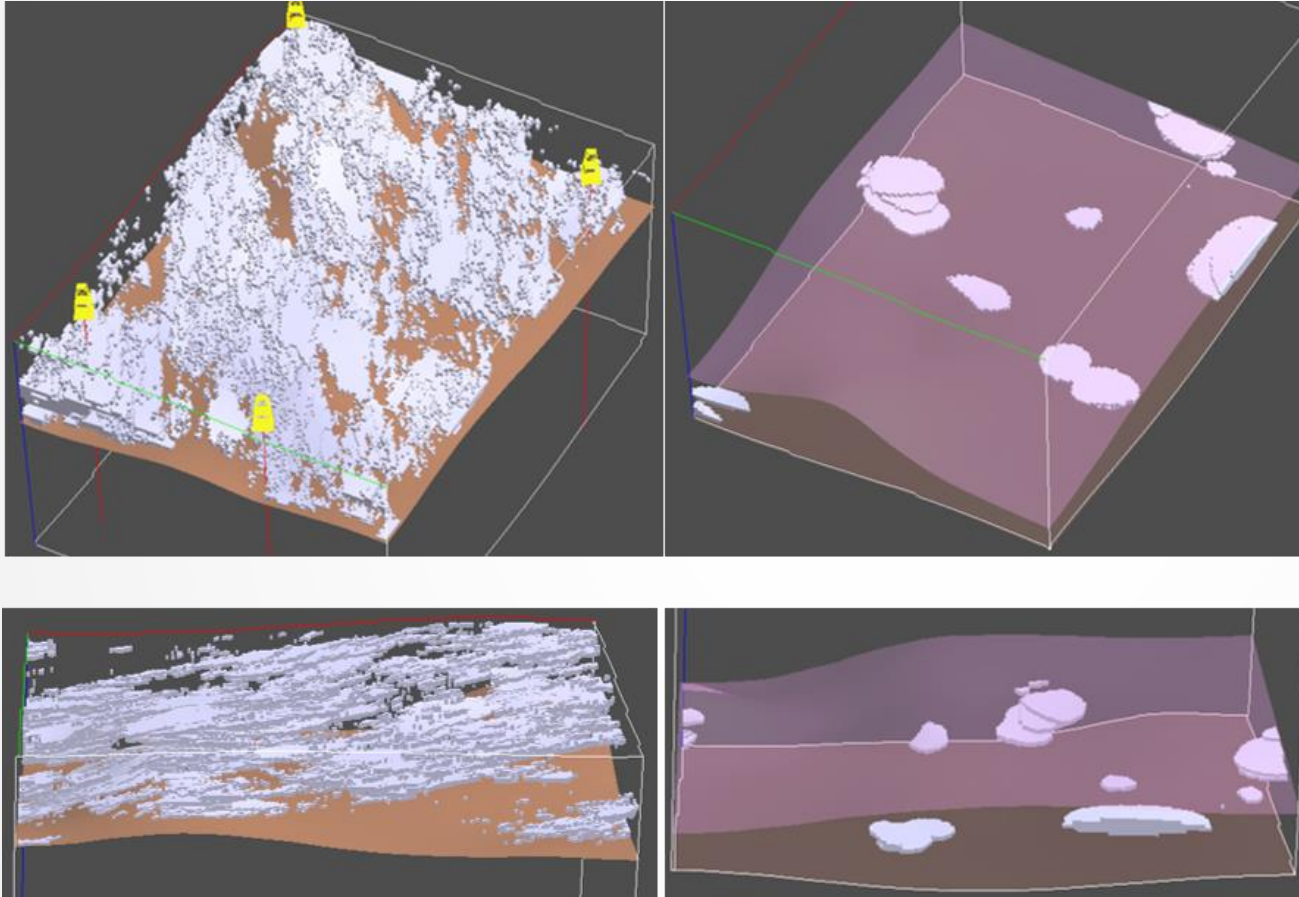
Развернутые представления об истории развития

Моделирование тел единого генезиса и возраста

Трёхмерное моделирование инженерно-геологического массива

Этап 3. Структурное моделирование

Подэтап 3.2 Вероятностное моделирование геологических неоднородностей

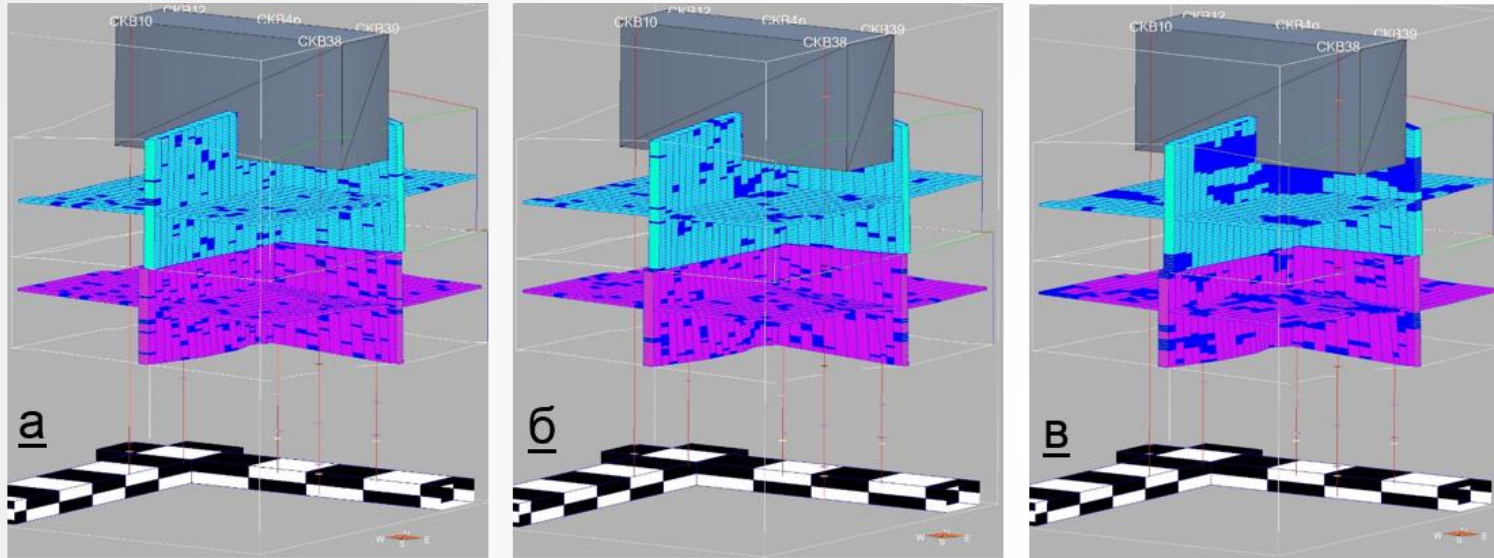


Выявление (вероятностное) наиболее опасных регионов в смоделированном трёхмерном инженерно-геологическом массиве: различные по форме и простиранию линзы слабых грунтов

Трехмерное моделирование инженерно-геологического массива

Этап 1. Структурное моделирование

Подэтап 3.2 Вероятностное моделирование геологических неоднородностей



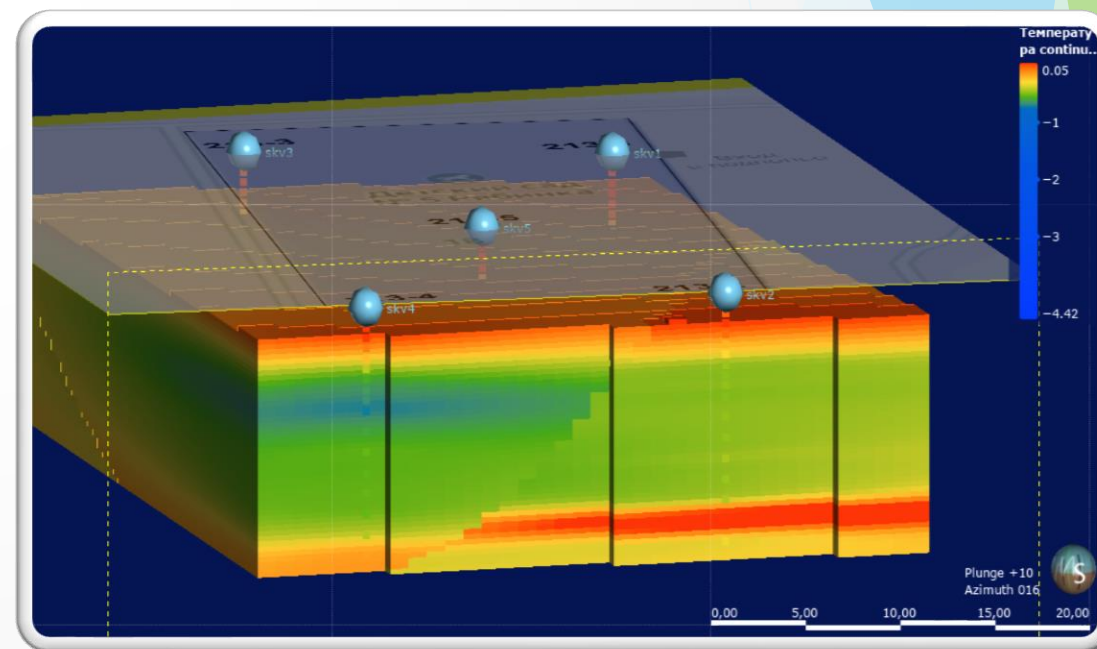
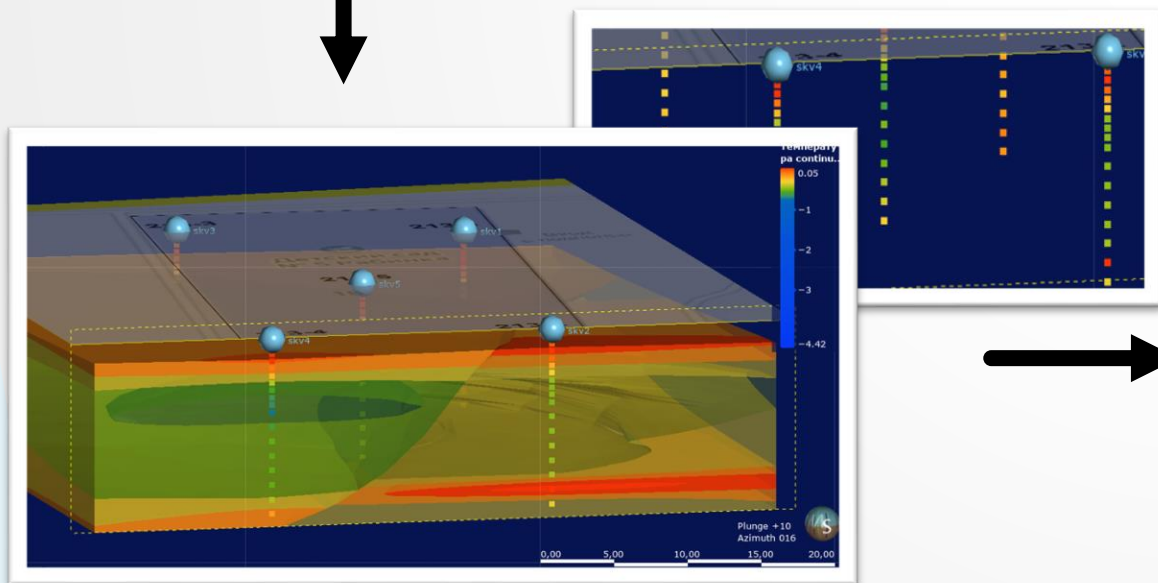
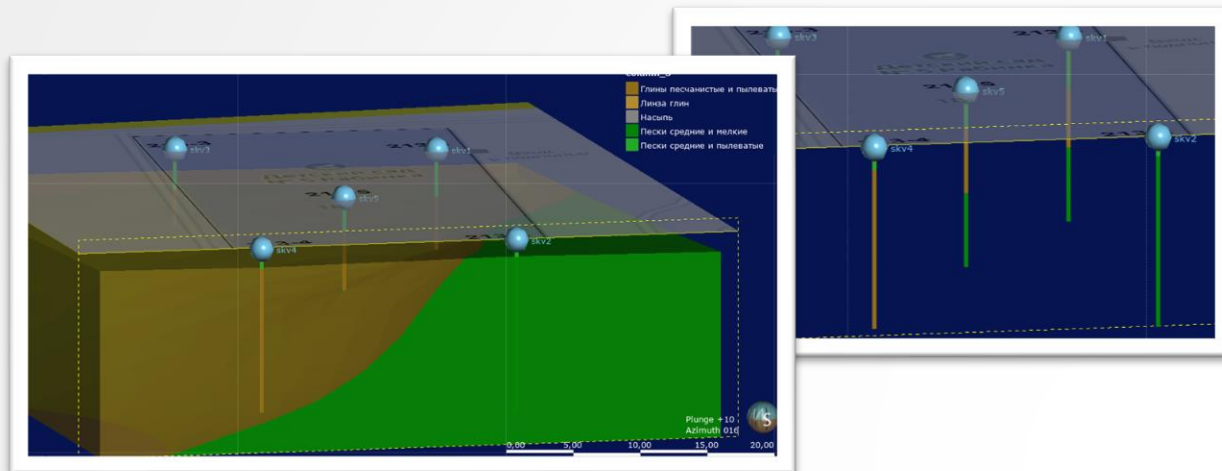
Реализация	Процентное содержание карстовых полостей, %		Средний размер карстовой полости, м	
	В толще K2	В толще K4	В толще K2	В толще K4
Без карста	0	0	-	-
Минимальный карст	<u>a</u> 8	11	0,63×3,15	0,44×2,20
Средний карст	<u>б</u> 12	12	0,95×4,75	0,68×3,40
Максимальный карст	<u>в</u> 29	22	2,01×10,05	0,99×4,95

Выявление (вероятностное) наиболее опасных регионов в смоделированном трехмерном инженерно-геологическом массиве: карстовые полости

Трехмерное моделирование инженерно-геологического массива

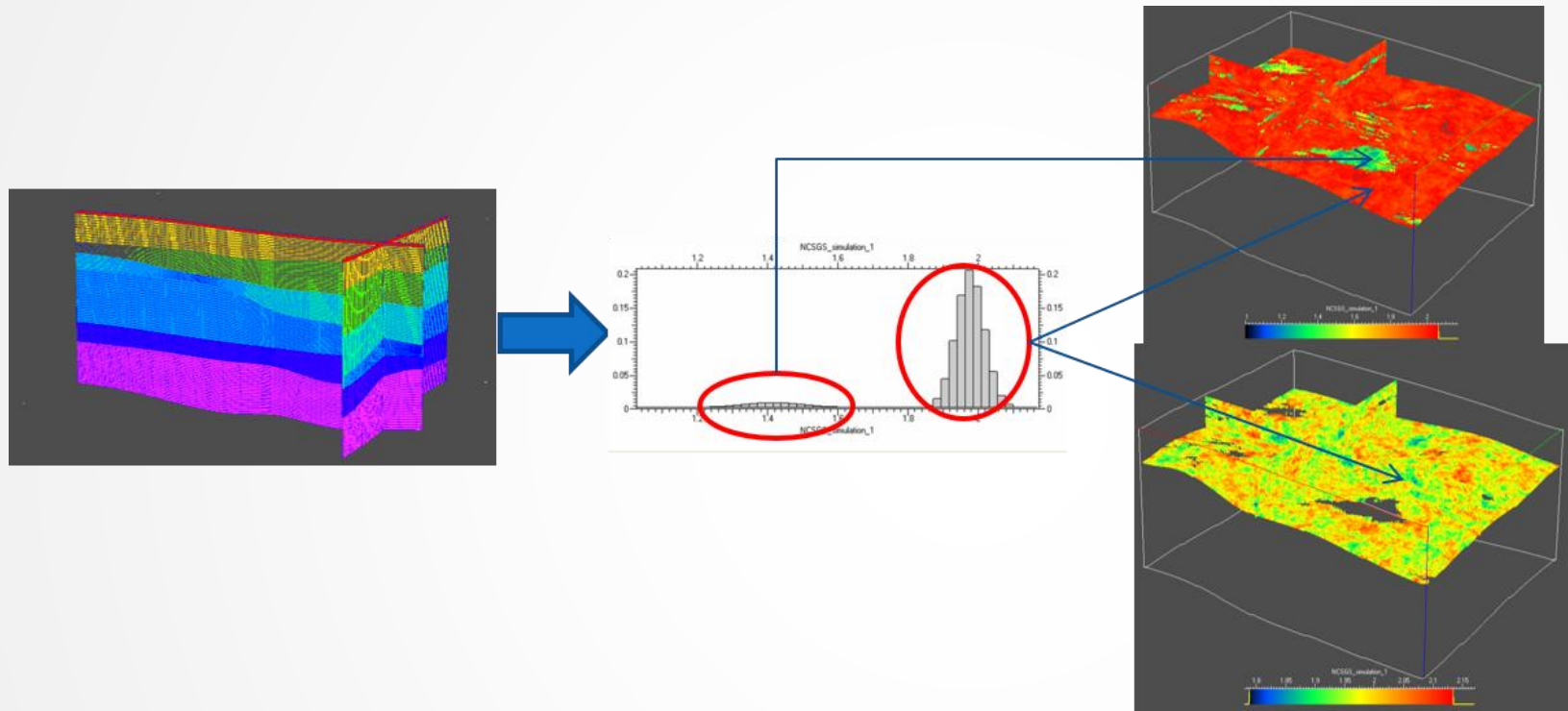
Этап 3. Структурное моделирование

Подэтап 3.3 Моделирование состояния грунтов в пределах литологических разностей



Трехмерное моделирование инженерно-геологического массива

Этап 4 Моделирование в пространстве свойств грунтов



Моделирование необходимого набора свойств, определяемого назначением модели

Моделирование для каждого отдельного геологического тела

Моделирование для отдельных геологических неоднородностей

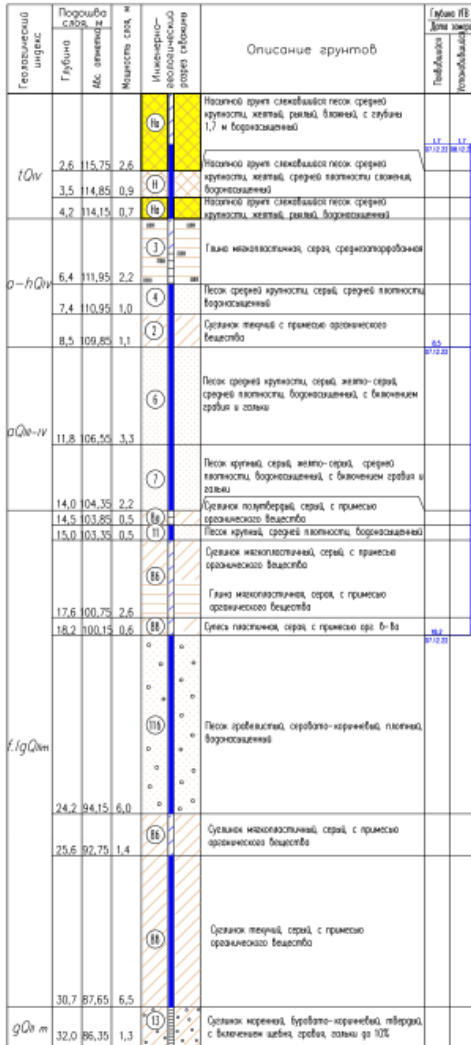
Использование геостатистических подходов на базе анализа вариограмм и законов распределения свойств

Трехмерное моделирование дисперсного инженерно-геологического массива основания зданий

Колонки буровых скважин

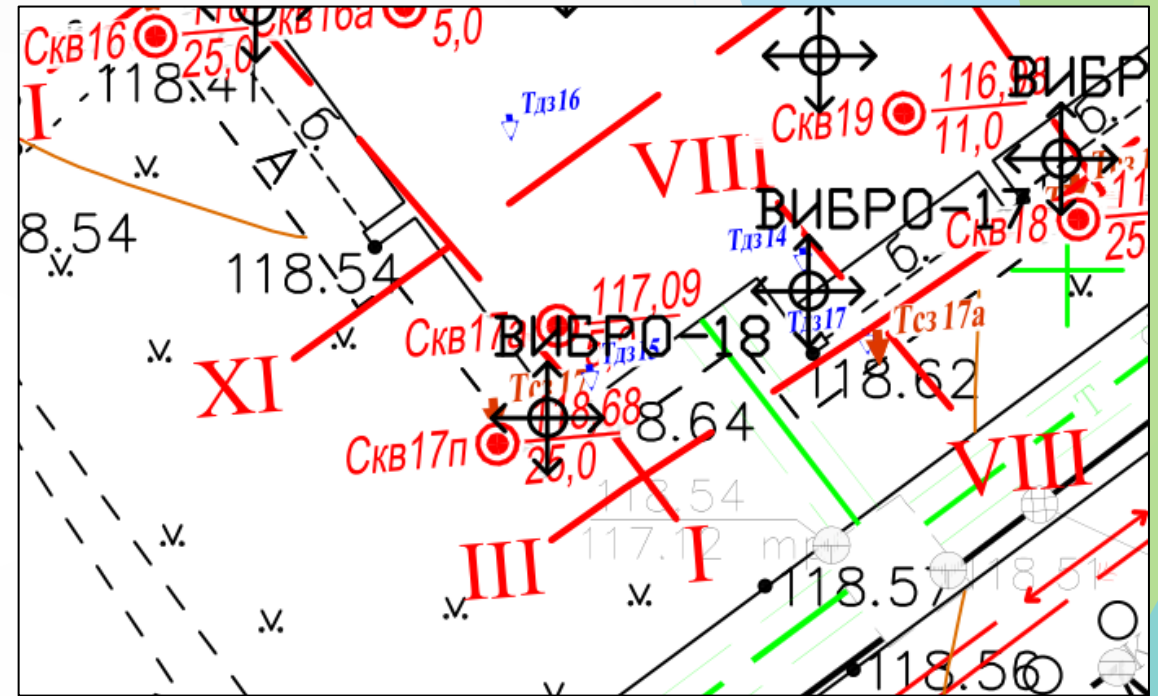
Карта фактического материала

Скважина 3
 Объект: Многоквартирный жилой дом по адресу: Московская обл., г. Дубна, ул. Академика Пантелеева Б. М., д. 18
 Период работ: 07.-08.12.2022 Масштаб: 1:100
 Координата X: 9078,68 Абс. отметка устья, м: 118,35
 Координата Y: 9560,77 Глубина скважины, м: 32
 Способ проходки: шнековое diam. 135мм до забоя



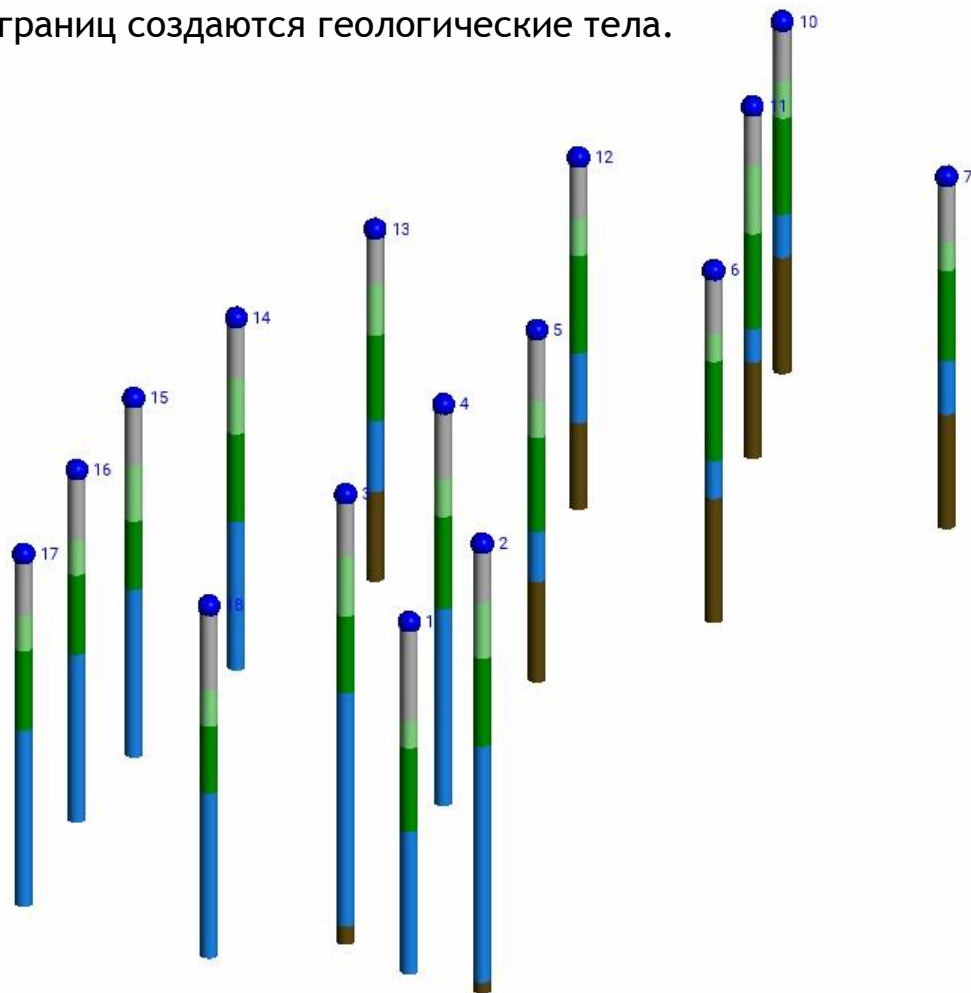
№ скв	x	y	z
1	9579,5	9068,83	118,18
2	9572,51	9080,7	118,21
3	9560,77	9078,68	118,35

№ скв	от	до	страт. инд.
3	0	2,6	tQIV
3	2,6	3,5	tQIV
3	3,5	4,2	tQIV
3	4,2	6,4	a-hQIV
3	6,4	7,4	a-hQIV
3	7,4	8,5	a-hQIV
3	8,5	11,8	aQIII-IV
3	11,8	14	aQIII-IV
3	14	14,5	f.lgQII m
3	14,5	15	f.lgQII m
3	15	17,6	f.lgQII m
3	17,6	18,2	f.lgQII m



Геологическая стратиграфо-генетическая трёхмерная модель

- Выделены и отмаркированы стратиграфо-генетические комплексы;
- Внутри замкнутых границ создаются геологические тела.



Моделируемое геологическое тело	Цвет	Взаимодействие
Техногенные отложения (<u>tQIV</u>)	Серый	Эрозионный контакт с подстилающими отложениями
Аллювиально-болотные отложения (<u>a-hQ IV</u>)	Светло-зеленый	Эрозионный контакт с подстилающими отложениями
Аллювиальные отложения (<u>aQ III-IV</u>)	Зеленый	Эрозионный контакт с подстилающими отложениями
Водно-ледниковые отложения (<u>fs.lg II m</u>)	Синий	Эрозионный контакт с подстилающими отложениями
Моренные отложения (<u>qII m</u>)	Коричневый	

Литологическая модель алювиально-болотных отложений (a-hQ IV)

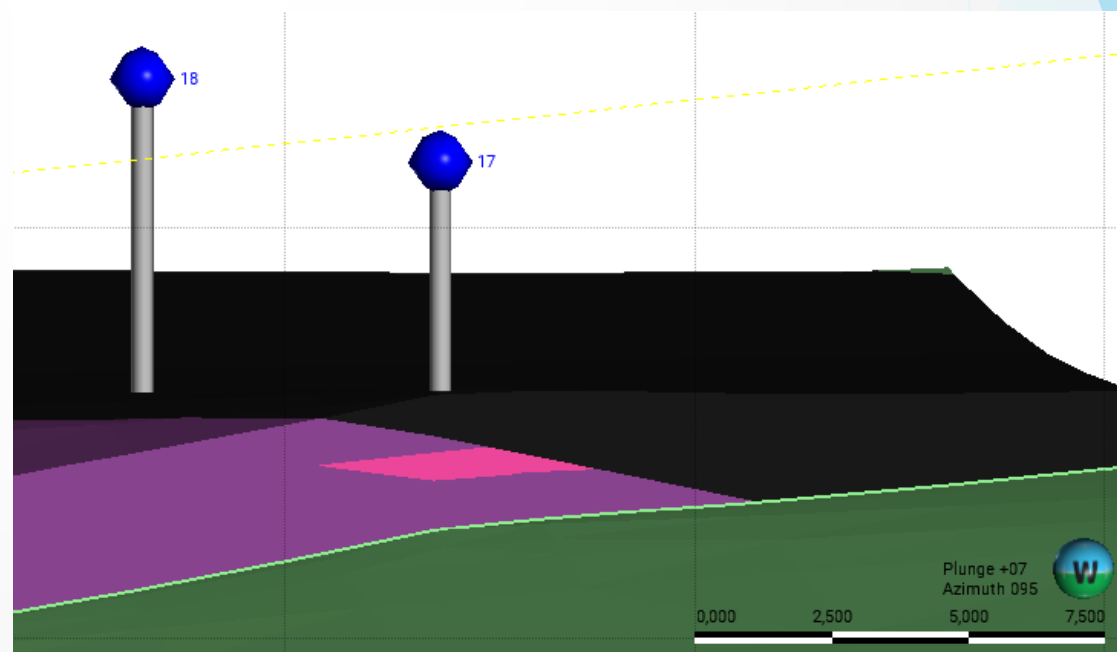
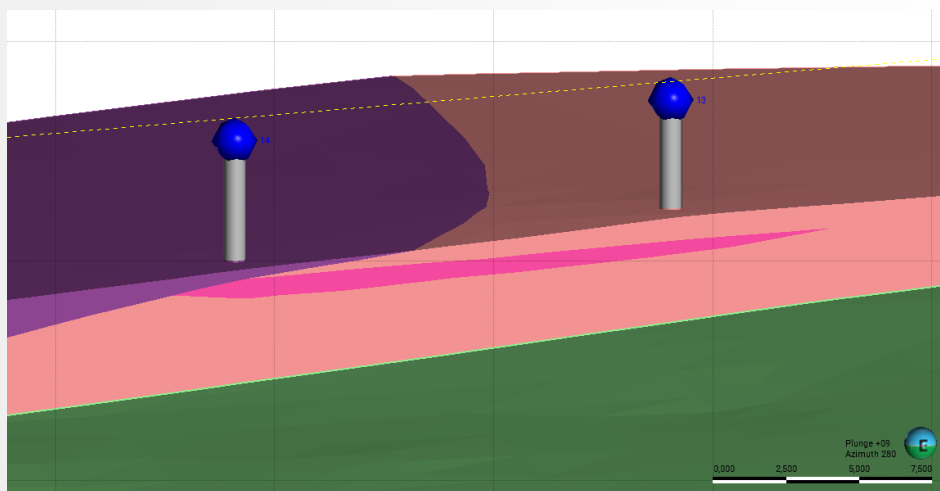
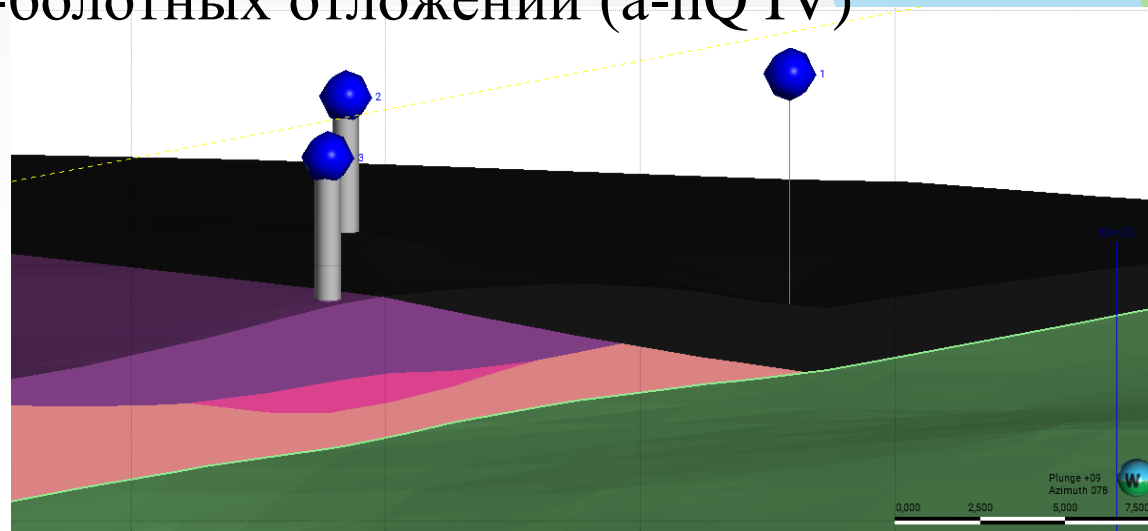
1a	Эрозионный контакт со всеми разностями a-hQ IV
4	Линзы и прослойки внутри ИГТ 3 и 2
3	Эрозионный контакт с ИГТ 2
2	Находится в основании комплекса

1a – Торф черный сильноразложившийся.

2 – суглинок

3 – глина

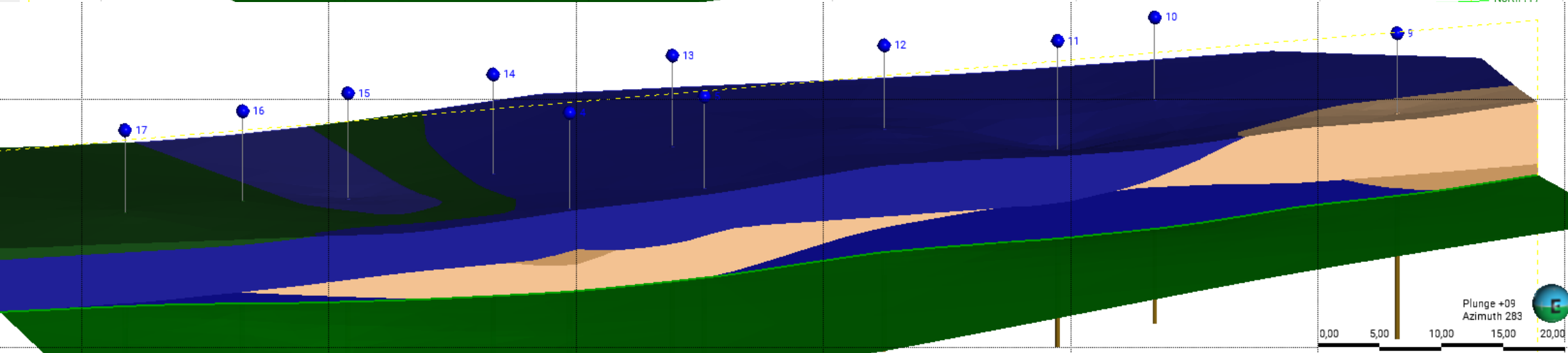
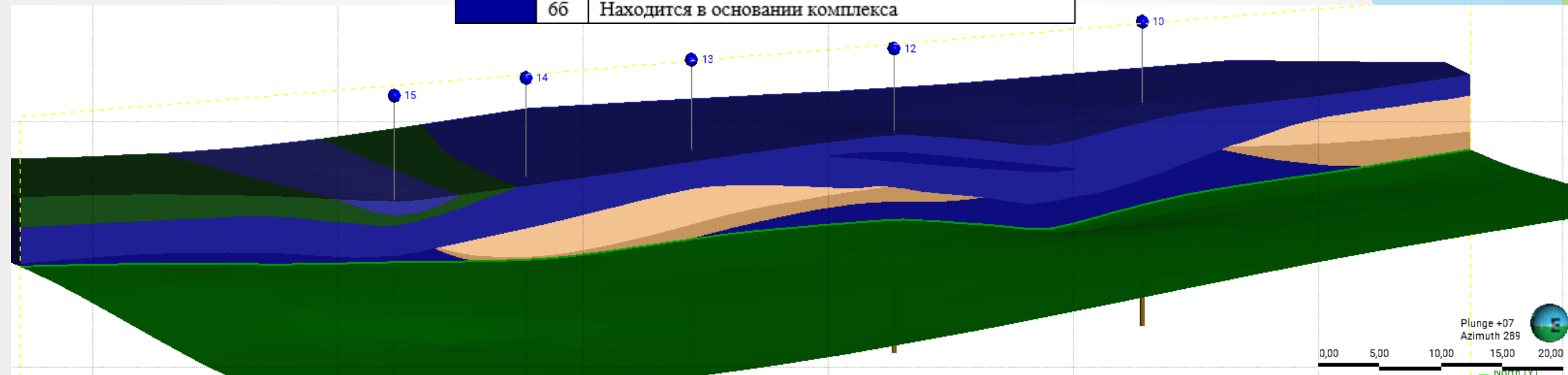
4 – песок



Литологическая модель Аллювиальные отложения (aQ III-IV)

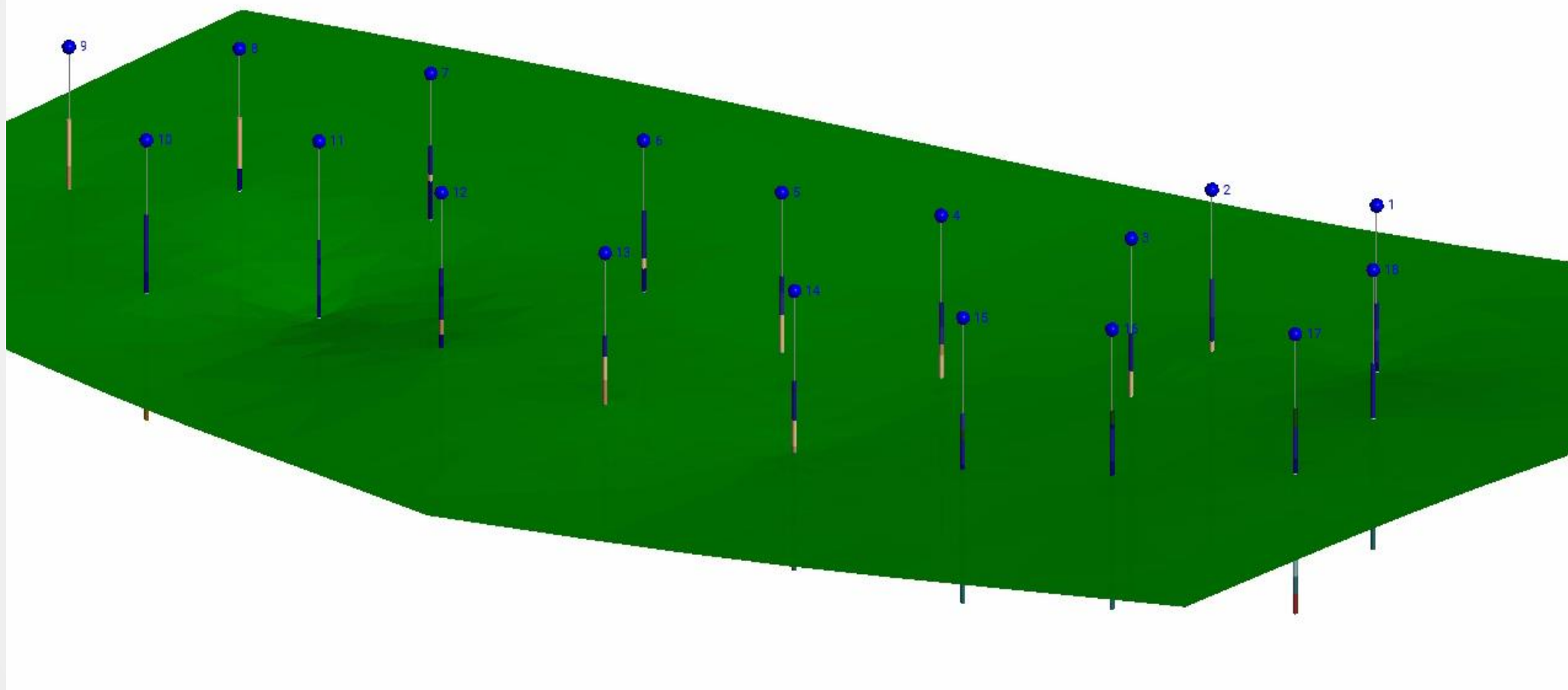
5	Эрозионный контакт со всеми разностями aQ III-IV
6a	Линзы и прослойки внутри ИГТ 6
6	Залегает сплошным чехлом на ИГТ 6б, 7 и 7б. Присутствуют линзы 6б.
7	Залегает сплошным чехлом на ИГТ 6б и 7б
7б	Залегает сплошным чехлом на ИГТ 6б
6б	Находится в основании комплекса

песок мелкий
песок средней крупности
песок крупный








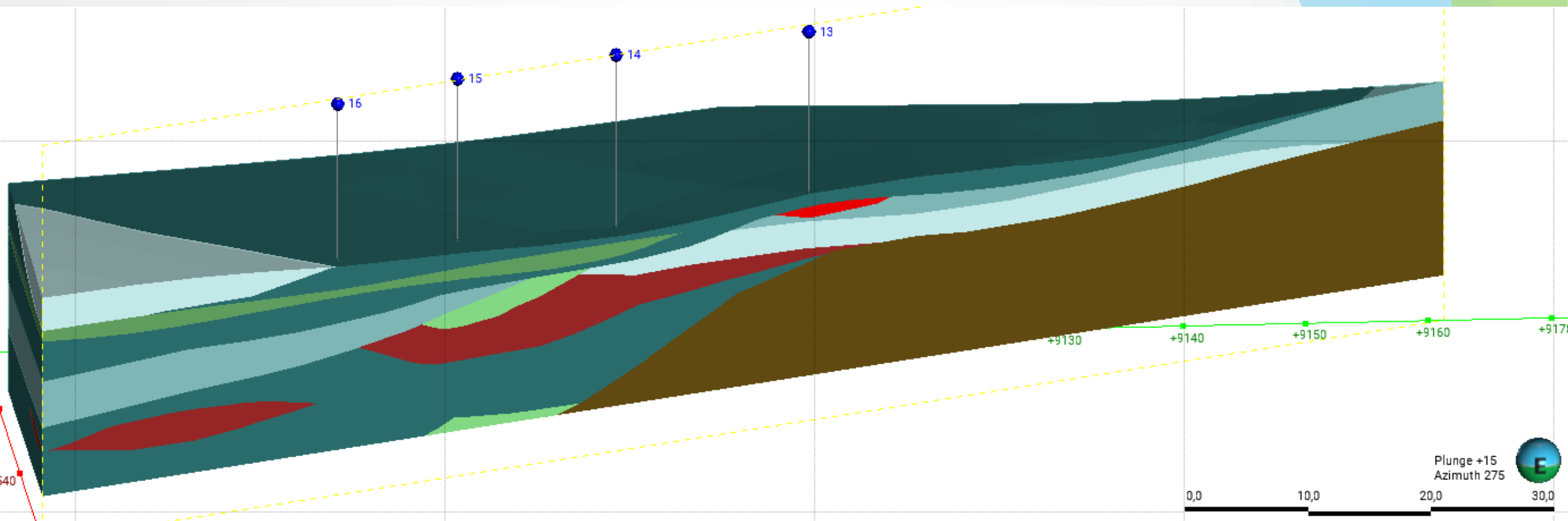
Аллювиальные отложения (аQ III-IV)

5	Эрозионный контакт со всеми разностями аQ III- <u>IV</u>
6а	Линзы и прослой внутри ИГТ 6
6	Залегает сплошным чехлом на ИГТ 6б, 7 и 7б. Присутствуют линзы 6б.
7	Залегает сплошным чехлом на ИГТ 6б и 7б
7б	Залегает сплошным чехлом на ИГТ 6б
6б	Находится в основании комплекса

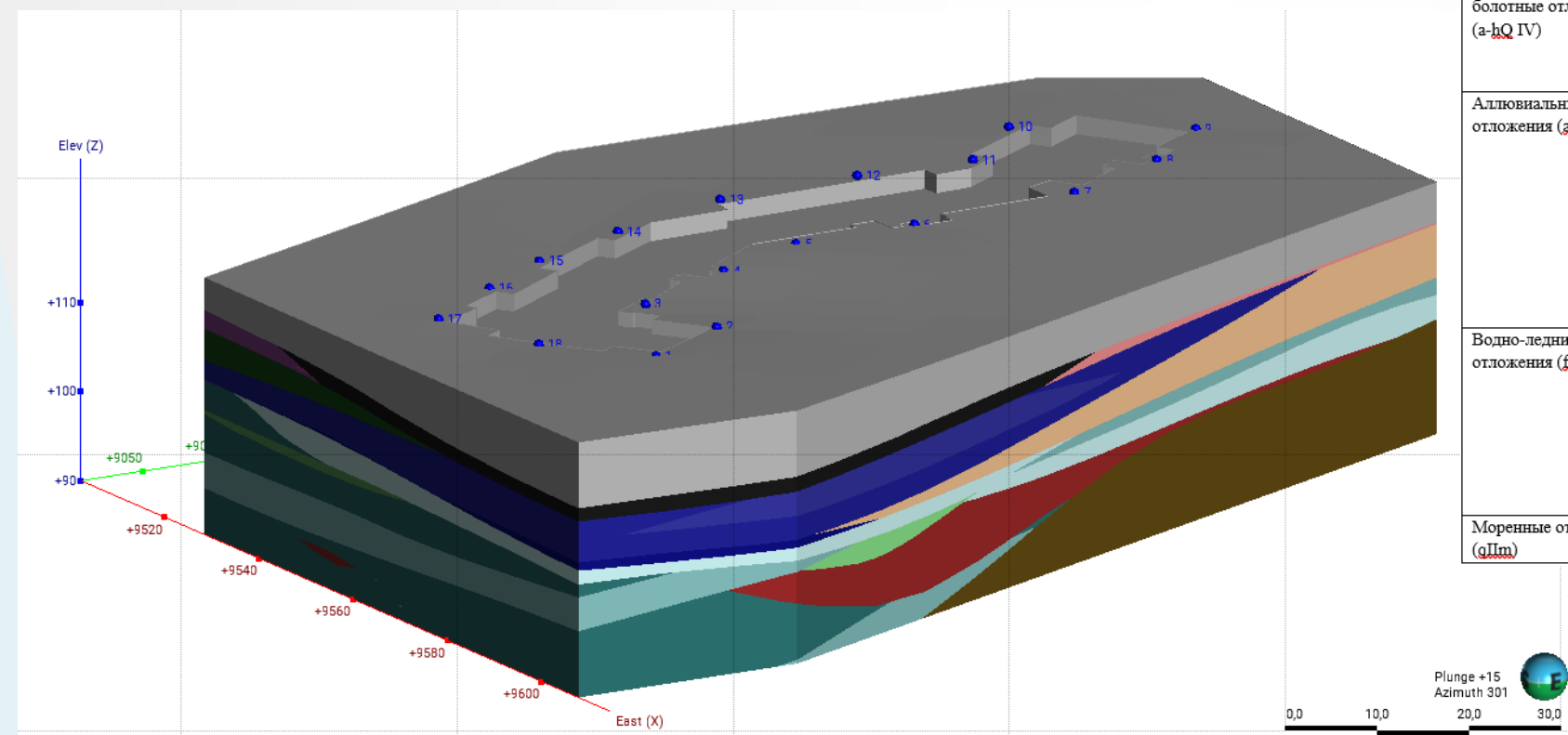


Водно-ледниковые отложения (fs,lg II m) и гляциальные отложения (gIIms)

Водно-ледниковые отложения (fs,lg II m)	Эрозионный контакт с подстилающими отложениями		10, 10б	Линзы и прослойки внутри ИГТ 8 (а, б, в)
			11	Линзы и прослойки внутри ИГТ 8 (а, б, в)
			11б	Протяженные пласты между ИГТ 8 (а, б, в)
			8 а, 8б, 8в	Мощные протяженные пласты, резко сменяющие друг друга
Моренные отложения (gIIms)			13	*_

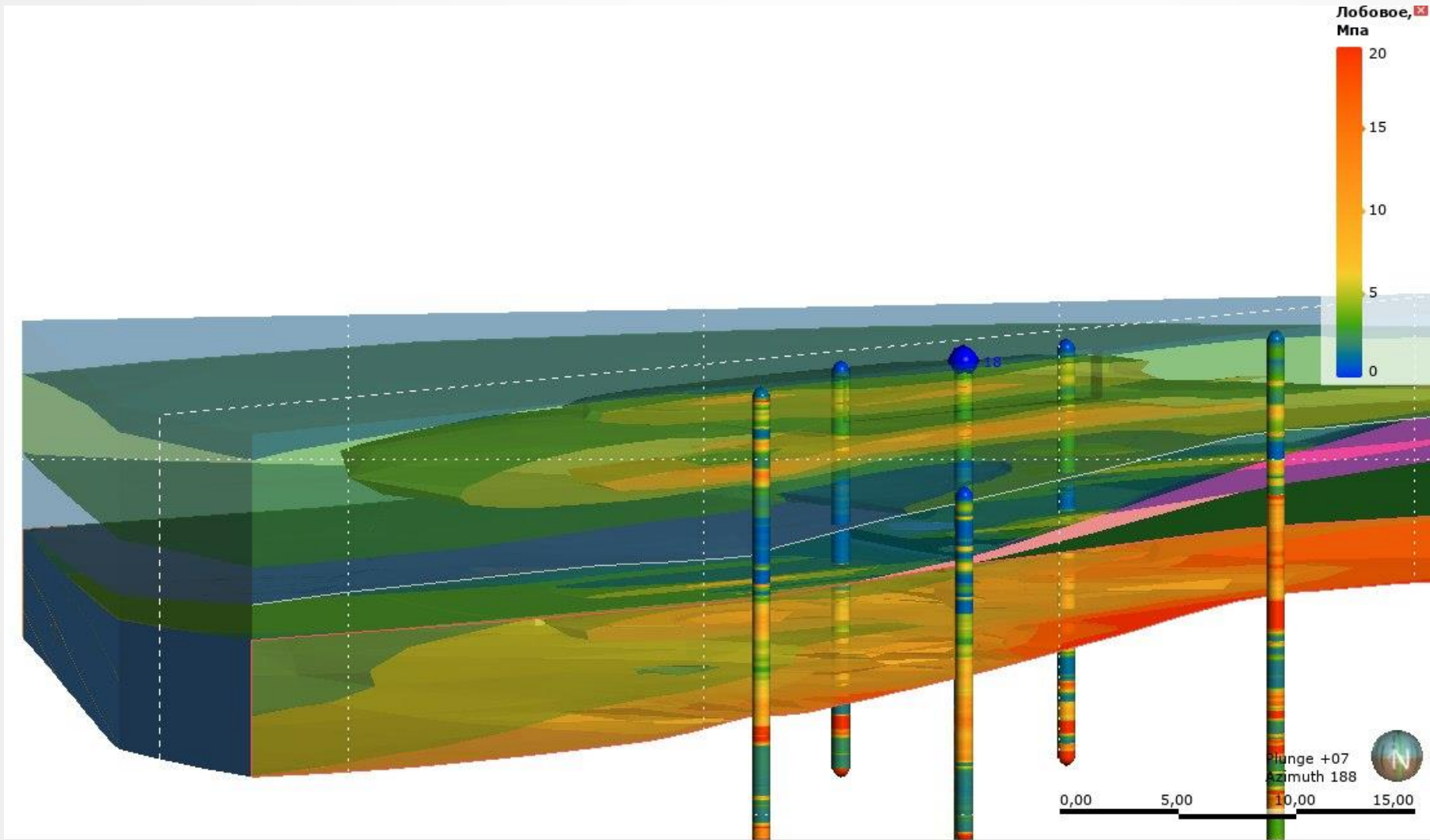


Итоговый вид трёхмерной инженерно-геологической модели



Моделируемое геологическое тело	Взаимодействие	Цвет	Моделируемое ИГТ	Характер залегания и взаимодействия
Техногенные отложения (tQIV)	Эрозионный контакт с подстилающими отложениями	Grey	H	Эрозионный контакт со всеми подстилающими отложениями
Аллювиально-болотные отложения (a-hQ IV)	Эрозионный контакт с подстилающими отложениями	Black	1a	Эрозионный контакт со всеми разностями a-hQ IV
		Pink	4	Линзы и прослои внутри ИГТ 3 и 2
		Purple	3	Эрозионный контакт с ИГТ 2
		Red	2	Находится в основании комплекса
Аллювиальные отложения (aQ III-IV)	Эрозионный контакт с подстилающими отложениями	Dark Green	5	Эрозионный контакт со всеми разностями aQ III-IV
		Light Blue	6a	Линзы и прослои внутри ИГТ 6
		Blue	6	Залегает сплошным чехлом на ИГТ 6б, 7 и 7б. Присутствуют линзы 6б.
		Orange	7	Залегает сплошным чехлом на ИГТ 6б и 7б
		Light Orange	7б	Залегает сплошным чехлом на ИГТ 6б
		Dark Blue	6б	Находится в основании комплекса
		Light Green	10, 10б	Линзы и прослои внутри ИГТ 8 (а, б, в)
Водно-ледниковые отложения (fs, lg II m)	Эрозионный контакт с подстилающими отложениями	Red	11	Линзы и прослои внутри ИГТ 8 (а, б, в)
		Dark Red	11б	Протяженные пласты между ИГТ 8 (а, б, в)
		Light Blue	8 а, 8б, 8в	Мощные протяженные пласты, резко сменяющие друг друга
		Dark Blue	8	Мощные протяженные пласты, резко сменяющие друг друга
Моренные отложения (qIIм)		Brown	13	*

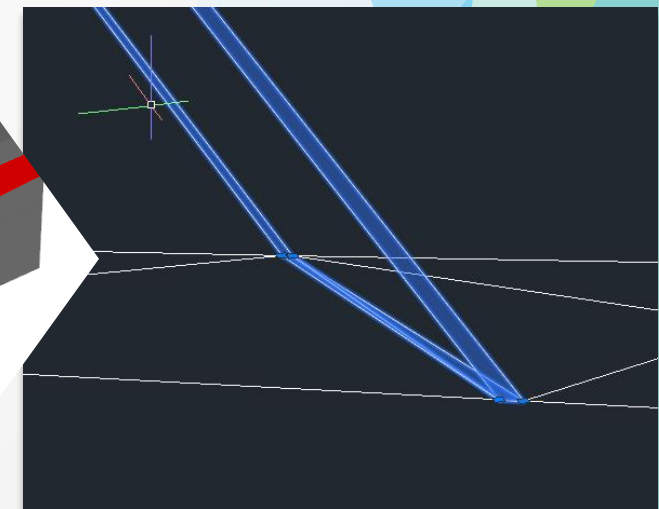
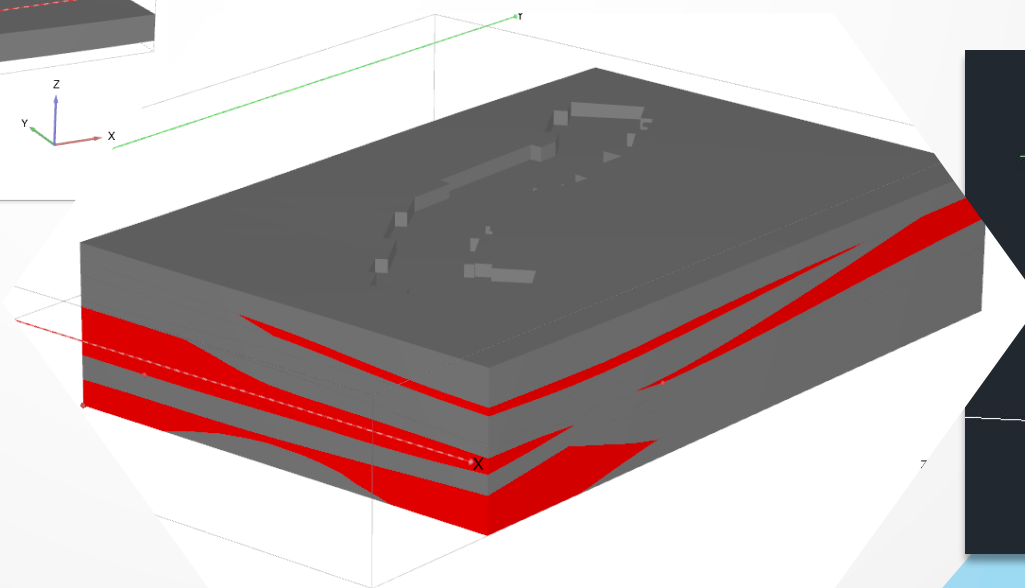
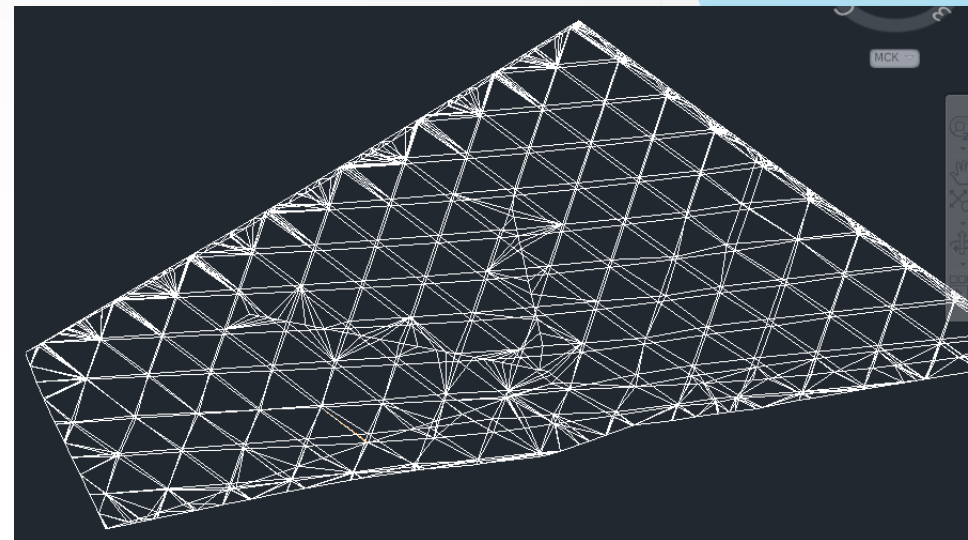
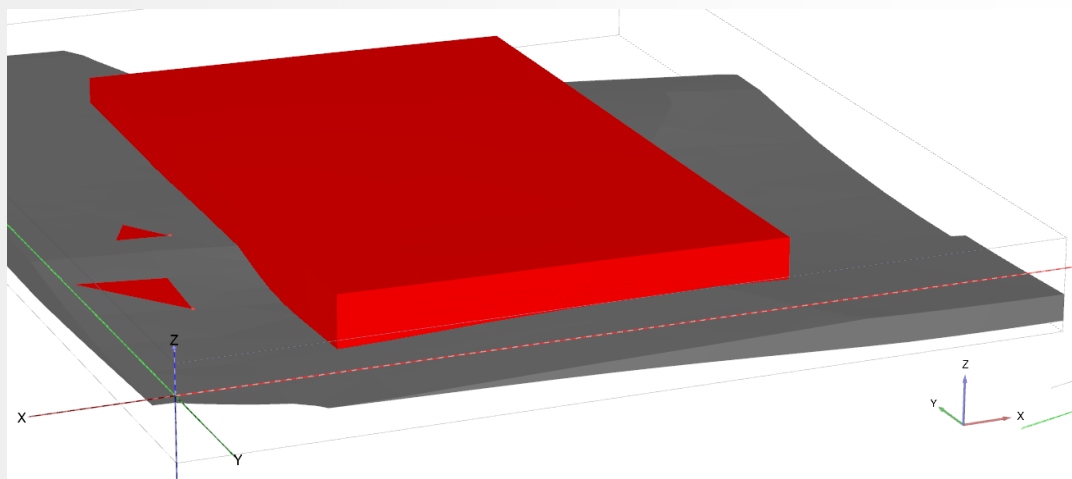
Геостатистическое моделирование данных статического зондирования проведено для каждого генетического геологического тела отдельно



Экспорт в расчетный комплекс

Из твердотельного куба вырезаются объёмы по каркасу ИГТ, состоящего из сотен и тысяч конечных элементов разного размера.

На сегодня отсутствует оптимизация триангуляционной сетки для экспорта в расчётную среду конечных элементов, из-за чего наблюдается эффект вырождения конечных элементов



Финальный вид модели в PLAXIS

Material sets

Project materials

Set type: Soil and interfaces

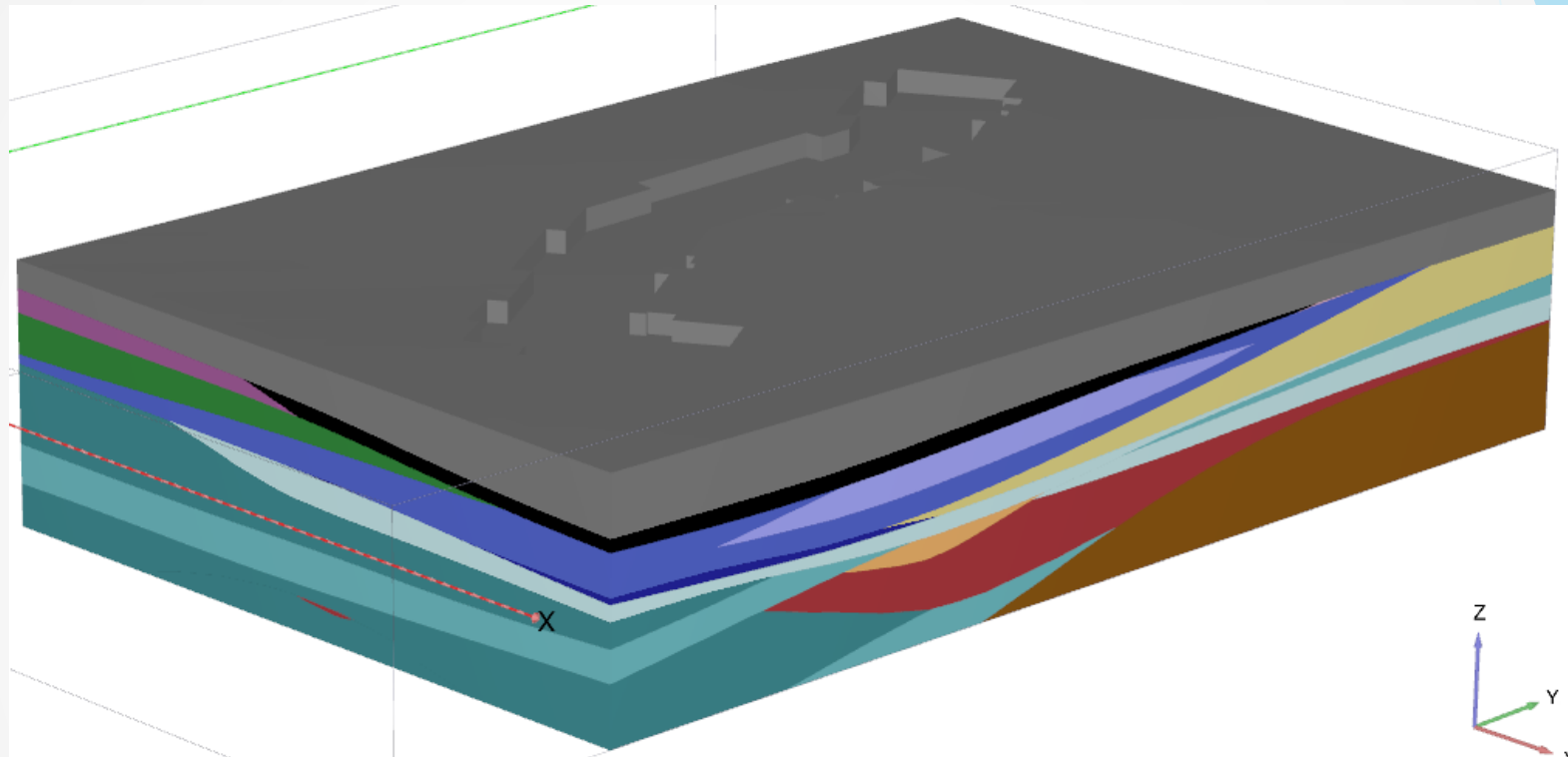
Group order: None

- 10
- 106
- 11
- 116
- 13
- 1a
- 2
- 3
- 4
- 5
- 6
- 6A
- 6B
- 7
- 76
- 8a
- 86
- 8B

New... Edit... SoilTest

Copy Delete

OK



Soil - Mohr-Coulomb - 10

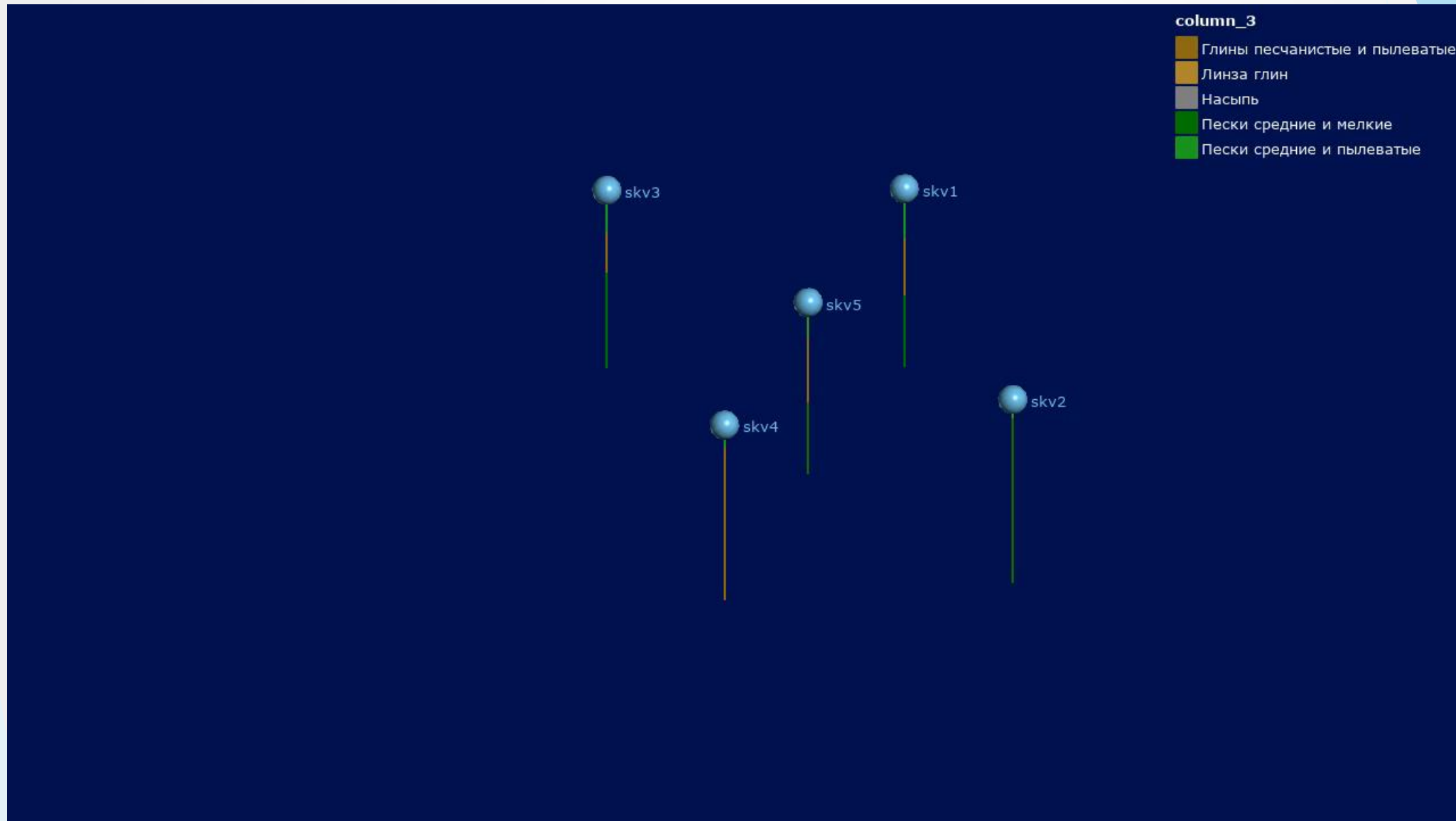
General Parameters Groundwater Interfaces Initial

Property	Unit	Value
Material set		
Identification		10
Material model		Mohr-Coulomb
Drainage type		Drained
Colour		RGB 240, 215, 122
Comments		
General properties		
Y _{unsat}	kN/m ³	18,50
Y _{sat}	kN/m ³	18,50

General Parameters Groundwater Interfaces Initial

Property	Unit	Value
Stiffness		
E'	kN/m ²	27,00E3
v' (nu)		0,000
Alternatives		
G	kN/m ²	13,50E3
E _{oed}	kN/m ²	27,00E3
Strength		
c' _{ref}	kN/m ²	4,000
φ' (phi)	°	26,00
ψ (psi)	°	0,000

Трёхмерная модель мёрзлого инженерно-геологического массива, г. Салехард



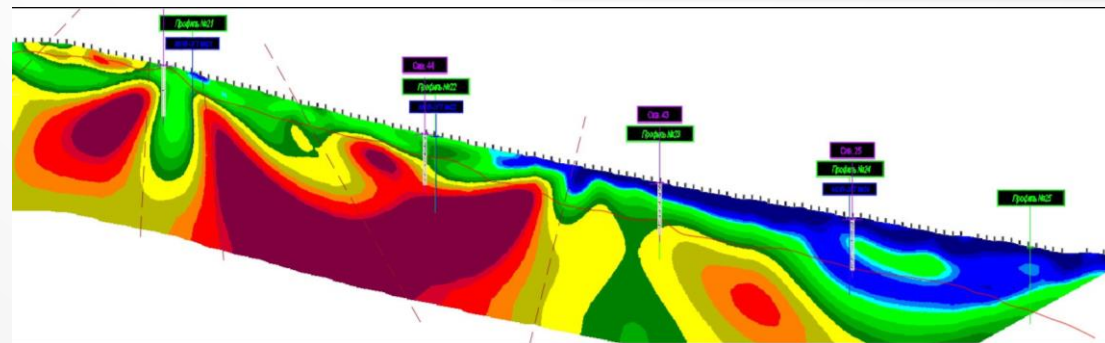
Трехмерное 2-этапное моделирование сложносоставного инженерно-геологического массива - территория особо опасного и технически сложного объекта

Скважина 28н

Объект: Установа производства Метанола.. НЗМ.ИПТ
 Координата X:16669,304
 Координата Y:44060,667
 Масштаб 1:100
 Абс. отметка устья 63,35
 Глубина скважины 25,0
 Способ проходки колонковое 127 мм..

Геологический интервал	Породы слои м		Мощность слоя м	Иллюстрация геологической разре скважины	Описание грунтов	Проект вынос марки АЗО	Глубина УЗВ	Дата замера	Глубина отбора образцов
	Глубина	Абс. отметка							
IQ _V	1,3	62,05	1,3	(41h)	Насыщенный грунт - Щебеночно-гравийный грунт серый местами серо-коричневый с силицистым твердым заполнителем				0,3
	2,0	61,35	0,7	(31h)	Насыщенный грунт - Древяный грунт серо-коричневый с силицистым твердым заполнителем, с включением щебня				1,3
	2,4	60,95	0,4	(44)					2,3
				(44)	Суглинок древесный раже-коричневый твердый с включением дресвы и щебня до 35%			3,2	3,5
eQ _V	6,5	56,85	4,1	(44)					5,5
	8,0	55,35	1,5	(44b)	Суглинок раже-коричневый мелкопластичный с включением дресвы и щебня до 20%			6,5	7,0
	9,5	53,85	1,5	(44b)	Суглинок древесный раже-коричневый мелкопластичный с включением дресвы и щебня до 35%				8,5
				(44)	Суглинок древесный раже-коричневый полутвердый с включением дресвы и щебня до 35%, с прослойки супеси пластичной				10,0
	12,6	50,75	3,1	(44)	Суглинок раже-коричневый тугопластичный с включением дресвы до 10%				11,5
	13,0	50,35	0,4	(44)	Суглинок древесный раже-коричневый полутвердый с включением дресвы и щебня до 35%, с прослойки супеси пластичной				12,8
ePZ-Q _{I-IV}	14,0	49,35	1,0	(44)	Суглинок древесный раже-коричневый полутвердый с включением дресвы и щебня до 35%, с прослойки супеси пластичной				14,0
				(50a)	Суглинок древесный, с включением дресвы и мелкого щебня до 40%, местами опесчаненый, с прослойки и линзами древесного грунта с силицистым заполнителем, наблюдается сорваный структура материнской породы				16,0
pPZ _{II}	20,1	43,25	6,1						20,4
	25,0	38,35	4,9	(62b)	Щебенчатый грунт светло-коричневый местами бежевый с силицистым заполнителем полутвердый с глубиной 22,7м - мелкопластичный (обводнен), с прослойки супеси и суглинка с карманами древесного грунта с силицистым заполнителем Щебень пониженной прочности				24,0

- ▶ Данные бурения;
- ▶ Данные маршрутных наблюдений;
- ▶ Геофизические данные;



Схематизация инженерно-геологических условий

Исходя из геологического строения территории можно выделить 2 структурных этажа:

Нижний - отдельные тектонические клиновидные блоки габброидов Сергеевского комплекса раннего протерозоя (gvPRF_{1s}), мигматизированные кембрийской интрузией таудеминского комплекса гранитоидов (pyPZ1t). Получившаяся тектоническая структура разбита несколькими тектоническими разломами.

Верхний – дисперсный чехол элювиальных и элювиально-делювиальных отложений.

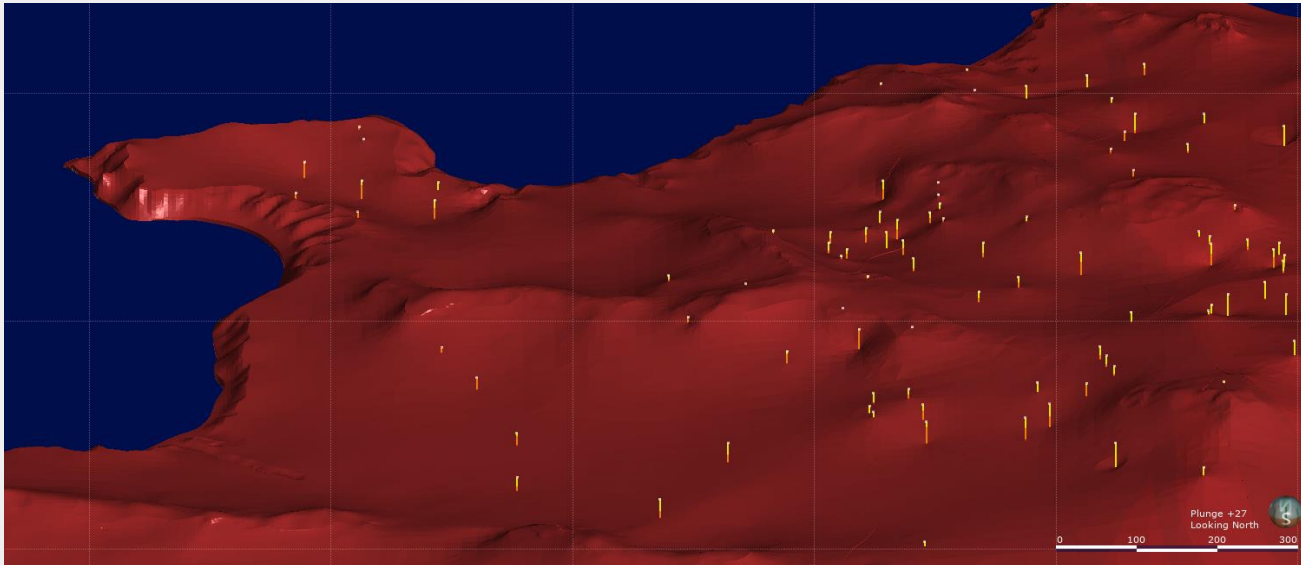
Разломные зоны представляют собой не просто поверхность смещения, а зону тектонической дезинтеграции, состоящей из грунтов пониженной прочности, и её ширина достаточно большая для того, чтобы отобразить её в модели.

Две разновидности элювиальных отложений: собственно структурный элювий и бесструктурные элювиально-делювиальные отложения.

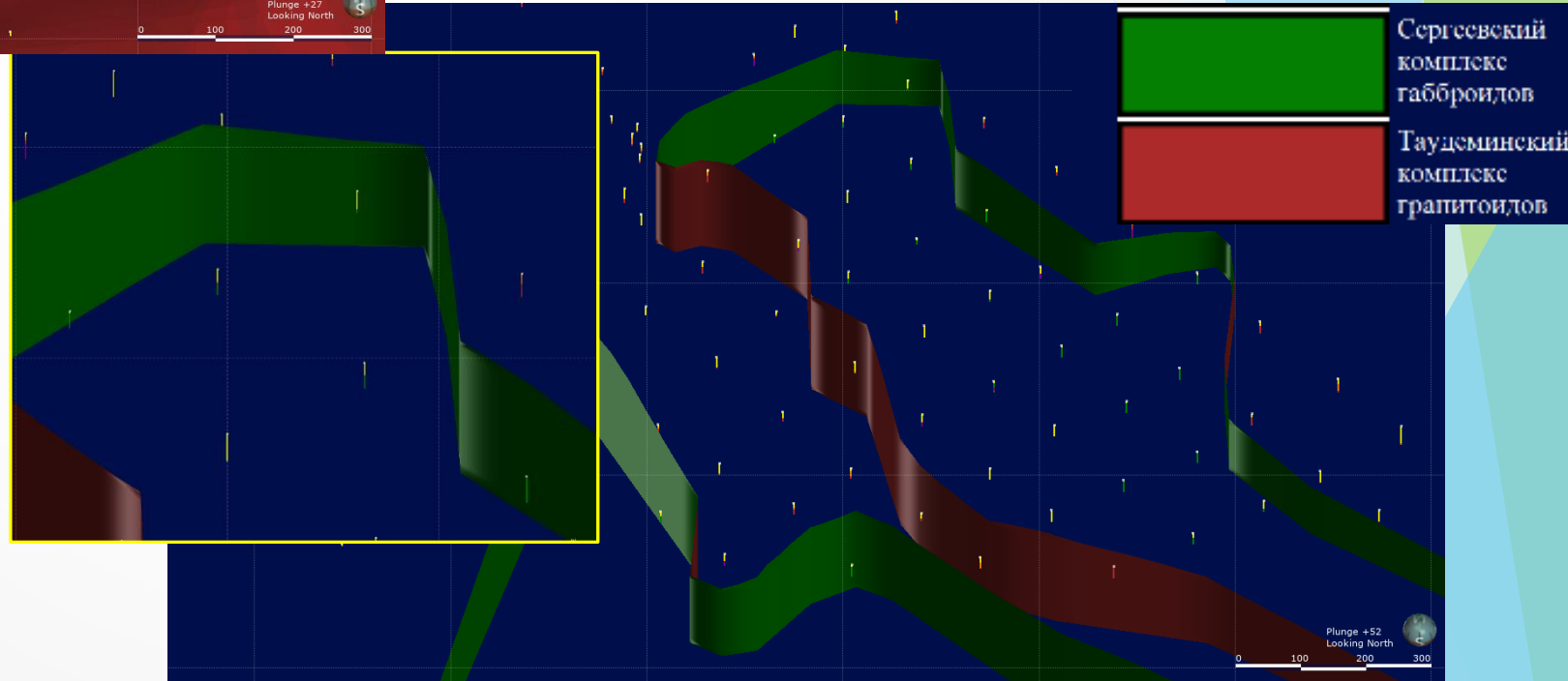
Структурный этаж	Цвет	Моделируемое геологическое тело		Взаимодействие
Верхний		Элювиально-делювиальные отложения		Эрозионный контакт с подстилающими отложениями
		Элювиальные отложения		Вложен в понижения рельефа кровли скальных пород; Нивелирует зоны разломов
		Тектонические зоны дезинтеграции		Сечение магматических тел
Нижний		Таудименский комплекс габброидов	Таудеминский комплекс гранитоидов	

Структурное моделирование

Рельеф кровли
скальных пород

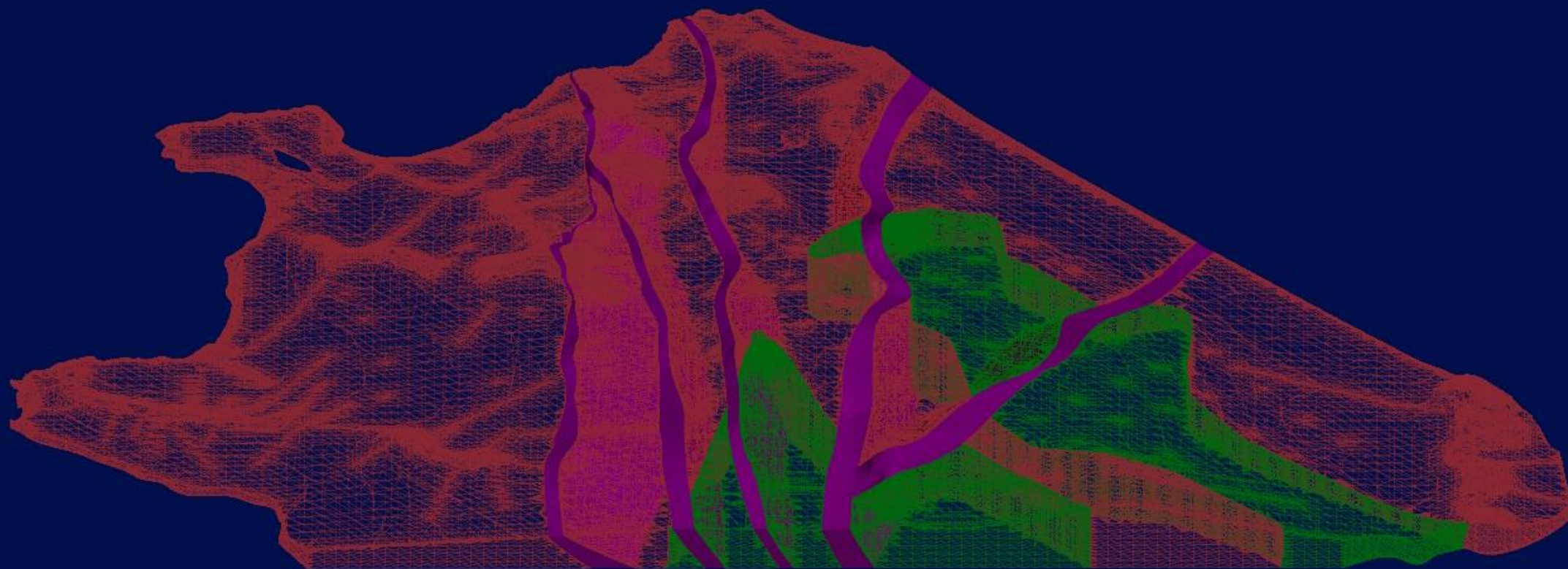
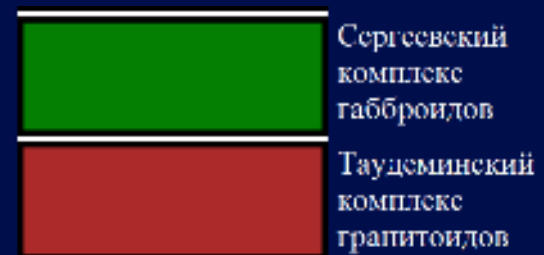


Границы мигматизации
Сергеевского комплекса
Таудеминским



Структурное моделирование

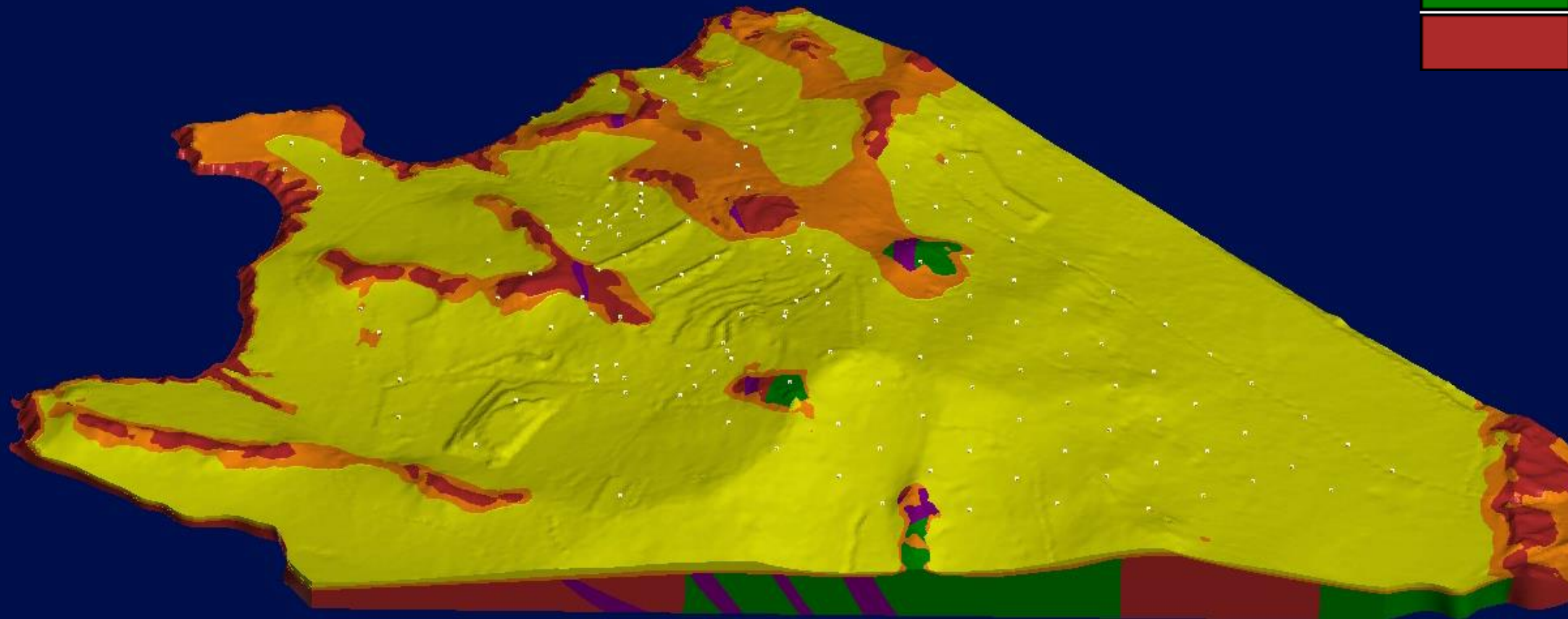
Сечение интрузивных комплексов разломными зонами



Общий вид трёхмерной геологической модели

Условные обозначения

	Эллиовиальные отложения
	Эллиовиально-делловиальные отложения
	Зона тектонической дезинтеграции
	Сергеевский комплекс габброидов
	Таудеминский комплекс граптоидов



2 Этап Трёхмерного инженерно-геологического моделирования

Схематизация инженерно-геологических условий

Вторая трёхмерная инженерно-геологическая модель отражает строение основной площадки строительства с инженерно-геологической точки зрения, а также является основой для геомеханической модели, по которой будут вестись дальнейшие расчеты напряженно-деформированного состояния и устойчивости откоса насыпи, что необходимо для принятия проектных решений по её укреплению. Её основными задачами является:

- ▶ Уточнение положения кровли скальных пород;
- ▶ Уточнение положения зон тектонических разломов;
- ▶ Выявление пространственных закономерностей распространения грунтов разных литологических разновидностей, внутри геологических тел с единым генезисом.

Схематизация инженерно-геологических условий

Нижний структурный этаж составляет Таудеминский комплекс гранитоидов, рассечённый двумя тектоническими разломами, Блоки Сергеевского комплекса в этой части территории не обнаружены.

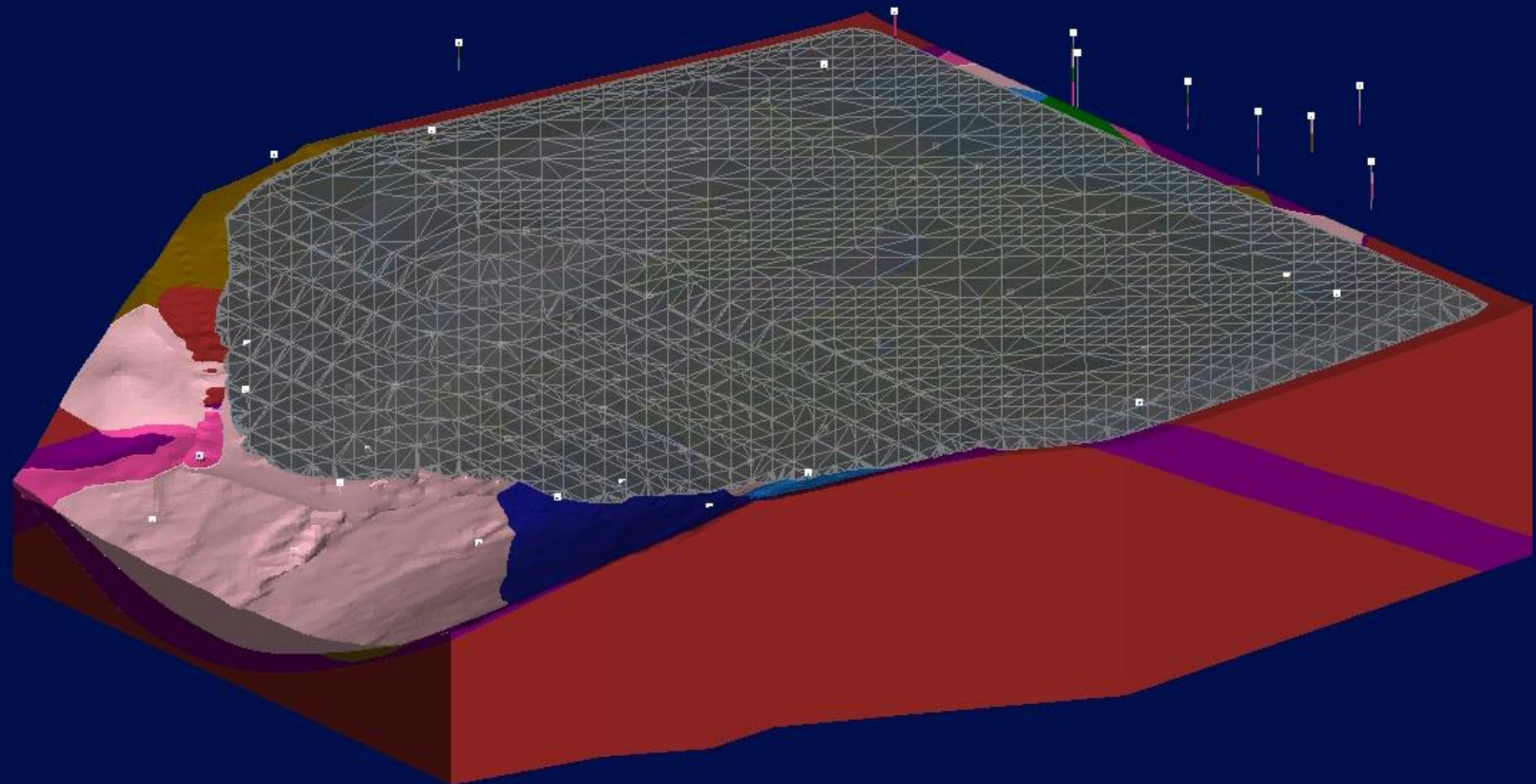
Верхний структурный этаж представлен теми же элювиальными и элювиально-делювиальными разностями, которые в свою очередь по результатам нескольких этапов инженерных изысканий были разделены на 8 инженерно-геологических элементов.

В модели принималось что в пределах элювиальных и элювиально-делювиальных тел литологические тела выделялись, если они:

- ▶ Встречается в двух или более соседних скважинах, расстояние между которыми менее 20 м;
- ▶ Имеет мощность более 1,5 м.

Структурный этаж	Цвет	Моделируемое геологическое тело	Взаимодействие	Цвет	Моделируемое инженерно-геологическое тело	Взаимодействие
Верхний		-	-		Техногенные грунты	Эрозионный контакт с подстилающими отложениями
	-	Элювиально-делювиальные отложения	Эрозионный контакт с подстилающими отложениями		441	Незакономерная литологическая изменчивость
					442	
					447	
					448	
					451	
	-	Элювиальные отложения	Вложен в понижения рельефа кровли скальных пород; Нивелирует зоны разломов		480	Закономерная литологическая изменчивость
				590		
				693		
		Тектонические зоны дезинтеграции	Сечение магматических тел		-	-
Нижний		Таудеминский комплекс гранитоидов	-		-	-

Общий вид трёхмерной модели сложносоставного инженерно-геологического массива с проектируемыми выемкой и насыпью



Условные
обозначения

- ш
- ИГЭ 441
- ИГЭ 442
- ИГЭ 447
- ИГЭ 448
- ИГЭ 451
- ИГЭ 448
- ИГЭ 590
- ИГЭ 693
- Зона тектонической
разломности
- Гранит

Выводы

1. Основой выделения инженерно-геологических тел является маркирование в 3х мерном пространстве точек, линий или точек и линий, разделяющих объекты различного генезиса и возраста по морфологическим признакам.

2. 3-х мерная модель инженерно-геологических массивов строго иерархична – инженерно-геологические тела выделяются последовательно от генезиса до состояния внутри пространства тел более высоких порядков

Взаимоотношение между геологическими телами наравне с их выделением является обязательным при построении структурной цифровой инженерно-геологической модели исходя из общеисторического развития.

3. Построение объемной модели моделируемого пространства - это математическая (геостатистическая) операция на базе вариационного анализа с учетом локальных и глобальных трендов (структурно-геологических), которая проводится либо с учетом фактора - построение границы всегда совпадает с маркерами, либо с учетом фактора - построение границы удовлетворяют заданным глобальным и локальным трендам.

4 Моделирования свойств грунтов и пространственных неоднородностей проводится строго внутри инженерно-геологических тел однородных по стратиграфо-генетическим, литологическим признакам и по состоянию.

5. Трёхмерной модели присуще более высокое качество относительно двумерно-табличных разрезов. Сам принцип построения 3D модели инженерно-геологических массивов предполагает разрешение неоднозначностей и противоречий во взаимоотношениях геологических элементов и тел различного возраста и генезиса. Таким образом, трёхмерное моделирование является своего рода верификацией инженерных изысканий, позволяющей найти ошибки в интерпретации скважин и даже зафиксировать фальсификацию изысканий.

7 Полученные модели визуально понятны людям без специализированного геологического образования и позволяют получить сечение (разрез) геологической среды любой сложности в любом направлении для нужд проектирования в пределах модели, а не только по скважинам.

8. Трёхмерные модели легко калибруются и актуализируются при внесении в них новых данных, что в некоторой степени освобождает от затрат на новые изыскания с случае изменения посадки сооружения.

9. Предоставляют проектировщикам инженерно-геологически обоснованную 3D-модель грунтового основания проектируемых сооружений в виде трехмерной сетки конечных элементов с возможностью задания свойств смоделированным геологическим телам.

10. Позволяют осуществлять на своей основе многовариантное проектирование и находить надежное и оптимальное решение.

11. Являются основой для проведения геотехнического мониторинга во время строительства и эксплуатации сооружений.