

# Обоснование добычи урана методом СПВ на основе геотехнологического моделирования

---

Владимир Угорец, Кент Петерсон,  
Матт Хартманн

---

Москва, 6 июня 2011 года

# Использование геофильтрационного и геотехнологического моделирования для СПВ

Этапы проекта СПВ	Целевое назначение геофильтрационного и геотехнологического моделирования
Подготовка месторождения к освоению	Определение гидрогеологических параметров, распределения уровней и составляющих баланса подземных вод
	Обоснование схемы расположения скважинных полигонов
	Обоснование дебитов откачки и нагнетания и разницы между ними для обеспечения условий нерастекания продуктивных растворов
	Обоснование схемы расположения наблюдательных скважин
	Определение возможного ущерба подземным водам от СПВ
	Определение состава выщелачивающих растворов
	График ввода полигонов в эксплуатацию
Прогнозирование добычи урана во времени	
Добыча и оптимизация извлечения урана	Оптимизация скважинных полигонов
	Оптимизация дебитов откачки и нагнетания
	Оптимизация состава выщелачивающих растворов
	Оптимизация плана добычи
Рекультивация месторождения	Прогнозирование откачки оставшихся продуктивных растворов и очистки водоносного горизонта с использованием обратного осмоса
	Обоснование состава восстановителя или нейтрализатора для восстановления первоначальных свойств водоносного горизонта
	Обоснование графика рекультивации
	Прогноз после-добычной стабилизации водоносного горизонта

Сложность моделирования увеличивается



# Программные средства наиболее часто используемые для моделирования СПВ

Геотехнологические модели СПВ		Составляющие геотехнологических моделей		
		Фильтрация подземных вод и растворов	Массоперенос	Геохимические реакции
Упрощенные модели основанные на построении лент тока и расчета одномерного реактивного массопереноса вдоль них		Аналитические модели ( <i>ISRFLOW</i> и, другие), <i>MODFLOW</i> , <i>FEFLOW</i>	Particle Tracking ( <i>MODPATH</i> и другие программы)	<i>PHREEQC</i>
Сложные модели основанные на 3-х мерной геофильтрации и 2-3-х мерном многокомпонентном реактивном массопереносе	<b>PHT3D</b>	<i>MODFLOW</i>	<i>MT3DMS</i>	<i>PHREEQC</i>
	<b>PHAST</b>	<i>HST3D</i>		<i>PHREEQC</i>
	<b>Geochemist's Workbench (GWB)</b>	<i>MODFLOW</i>	<i>GWB</i> ( программы <i>XT1</i> и <i>XT2</i> )	

Источники:

PHT3D - Prommer, Barry, Chiang and Zheng, 2001

PHAST - Parkhurst, Kipp, and Charlton, 2010

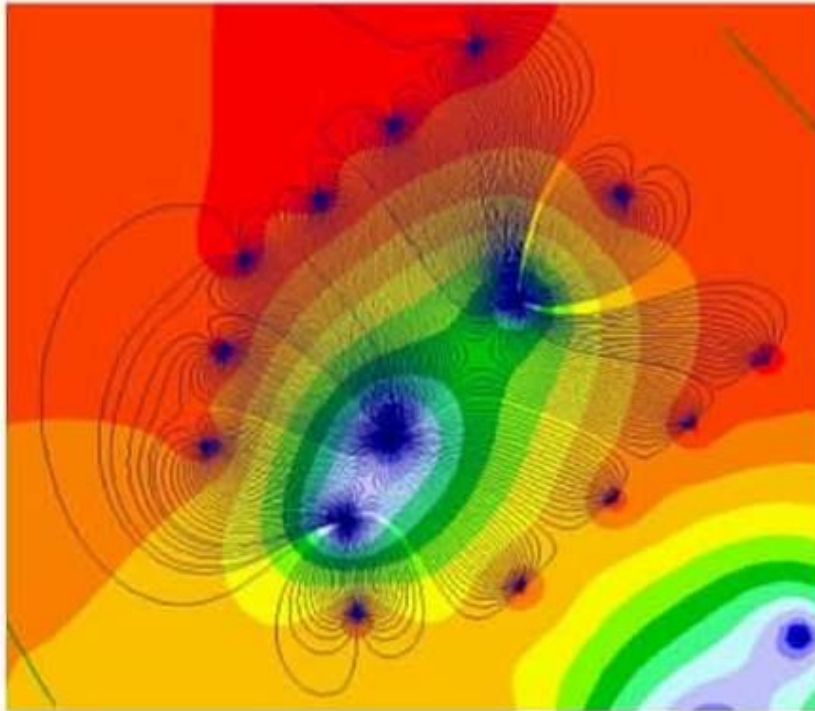
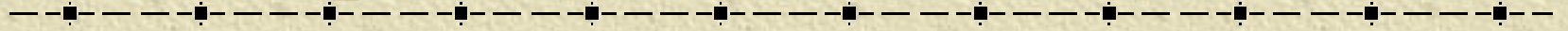
GWB - Bethke and Yeakel, 2010

PHREEQC- Parkhurst and Appelo, 1999

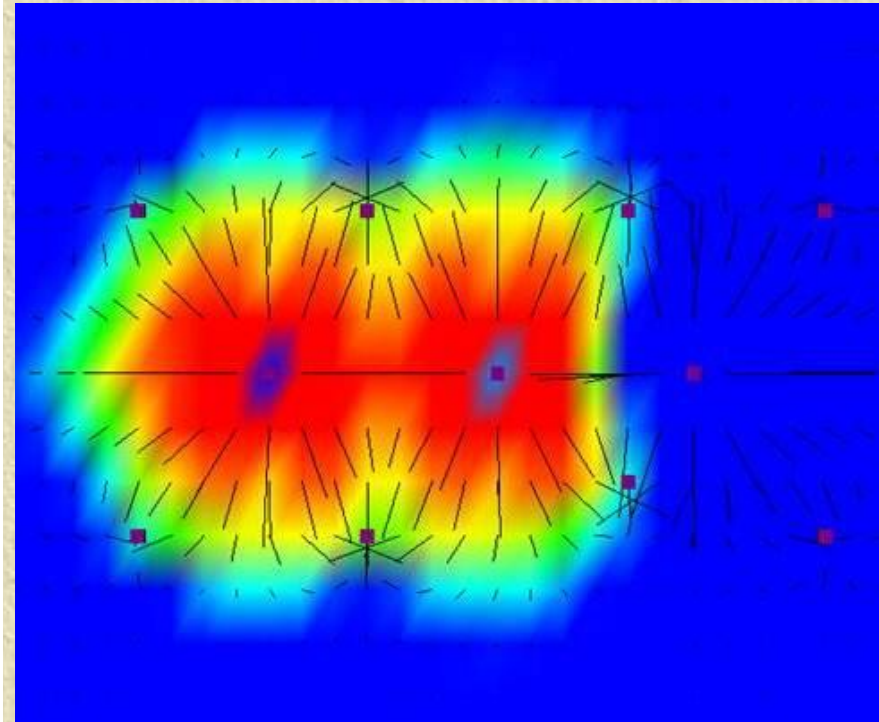
MODFLOW - McDonald and Harbaugh, 1988

MT3DMS - Zheng and Wang, 1998

# Примеры расчета реактивного массопереноса



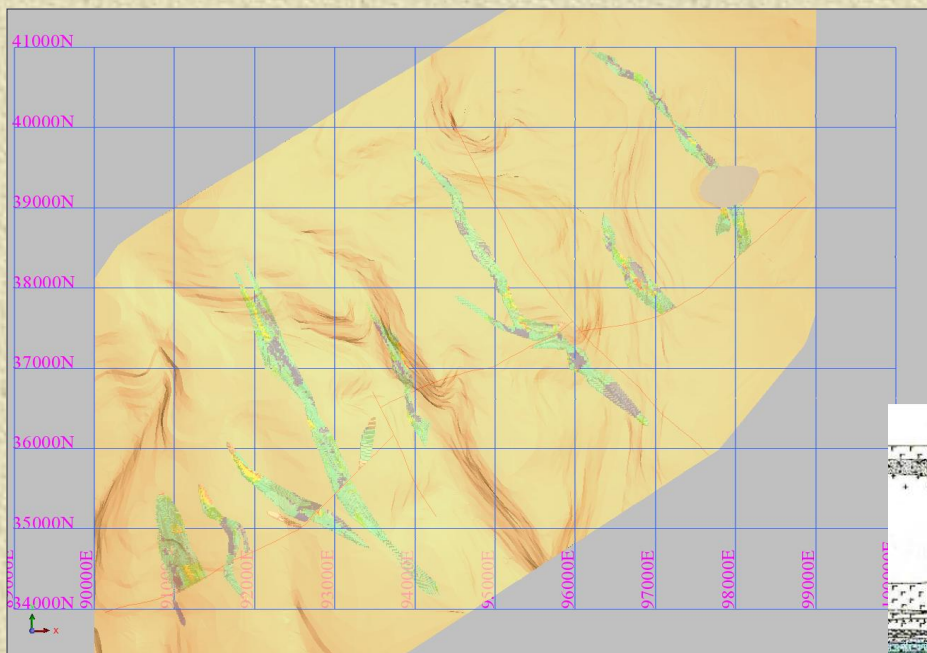
Одномерный массоперенос с химическими реакциями  
вдоль ленты тока



3-х мерный массоперенос с химическими реакциями в  
пределах блочной модели

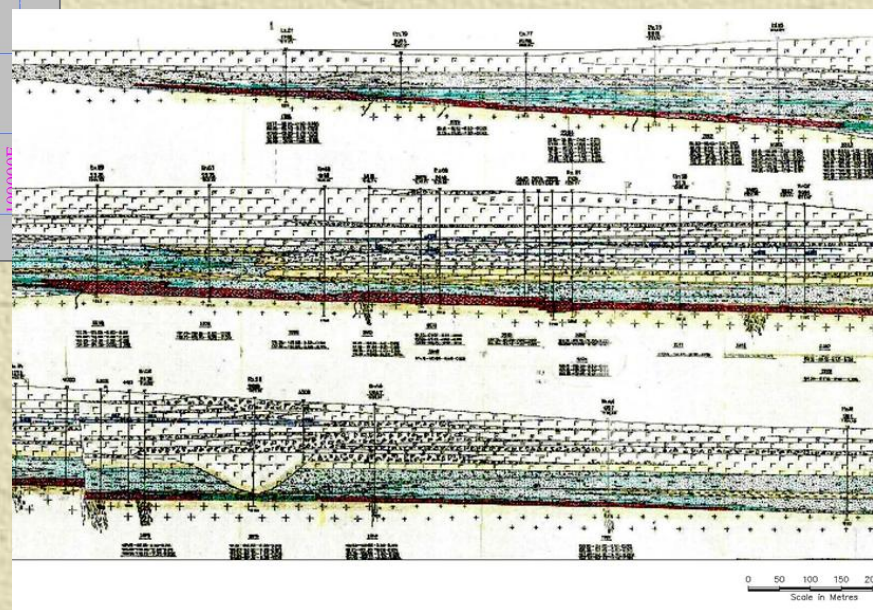


# Пример использования – Хиагдинское месторождение урана



Хиагдинское месторождение, в настоящее время разрабатываемое ОАО АТОМРЕДМЕТЗОЛОТО», локализуется в 7 неогеновых палеодолинах под покровом основных эффузивов, слагающих Амалатское плато

Продуктивный водоносный горизонт рыхлых отношений заключен между двумя водоупорами: подошвой базальтов и кристаллическим фундаментом и имеет напорный характер. Продуктивный водоносный горизонт имеет форму «пласт-полосы».





# Основные этапы моделирования и расчетов

- ❑ Разработка геотехнологической модели СПВ, используя аналитическую модель ISRFlow для построения лент тока и модель PHREEQC для расчета изменения концентрации урана в продуктивном растворе
- ❑ Калибровка модели к данным начального извлечения урана по индивидуальным скважинам двух опытно-промышленных блоков палеодолины 5 и обоснования расчетных геохимических параметров
- ❑ Построение модели типовых блоков рядной и гексагональной схем для выполнения прогнозов
- ❑ Выполнение прогнозов для разной продуктивности залежи
- ❑ Определение времени 80% извлечения урана в зависимости от продуктивности пласта
- ❑ Расчет годовой добычи из каждого блока в зависимости от его размеров и продуктивности
- ❑ Составление графика добычи урана из четырех основных палеодолин

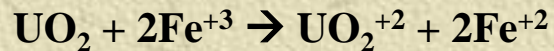
# Кинетические модели скорости реакций

Общая формула для скорости реакции всех кинетических фаз:

$$\text{Скорость реакции: } R_k = r_k (A_0/v) (m_k/m_{0k})^{n_0}$$

где:  $r_k$  = коэффициент скорости реакции для минерала “k” (FeS<sub>2</sub>, UO<sub>2</sub>, FeO(OH))  
 $A_0/v$  = площадь поверхности, доступная для окисления в расчете на единицу массы раствора  
 $m_{0k}$  = начальные моли минерала  
 $m_k$  = моли минерала в текущее время

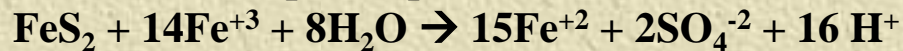
**Окисление уранинита трехвалентным железом:**



$$r_{\text{uraninite}} = k_{u1} [\text{Fe}^{+3}]^{0.11}$$

(Калибровка модели)

**Окисление пирита трехвалентным железом:**



$$r_{\text{pyrite}} = k_{p1} (\text{Fe}^{+3})^{0.30} (\text{Fe}^{+2})^{-0.47} (\text{H}^+)^{-0.32}$$

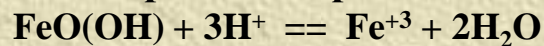
(Langmuir, 1997)

**Растворение уранинита:**



$$r_{\text{uraninite}} = k_{u2} [\text{SO}_4^{-2}] [\text{H}^+]$$

**Растворение гидроокиси железа (гётита), при котором образуется Fe<sup>+3</sup> :**

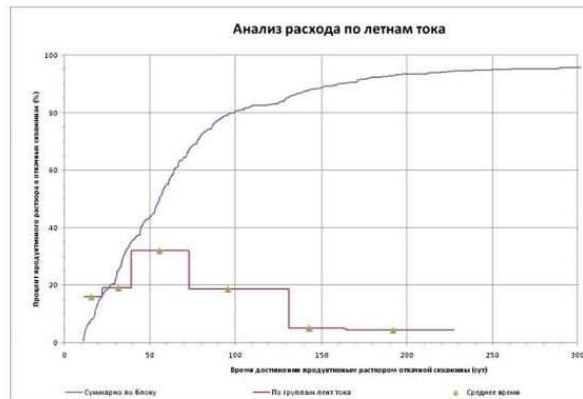


$$r_{\text{goethite}} = k_{g1} * si(\text{goethite})$$

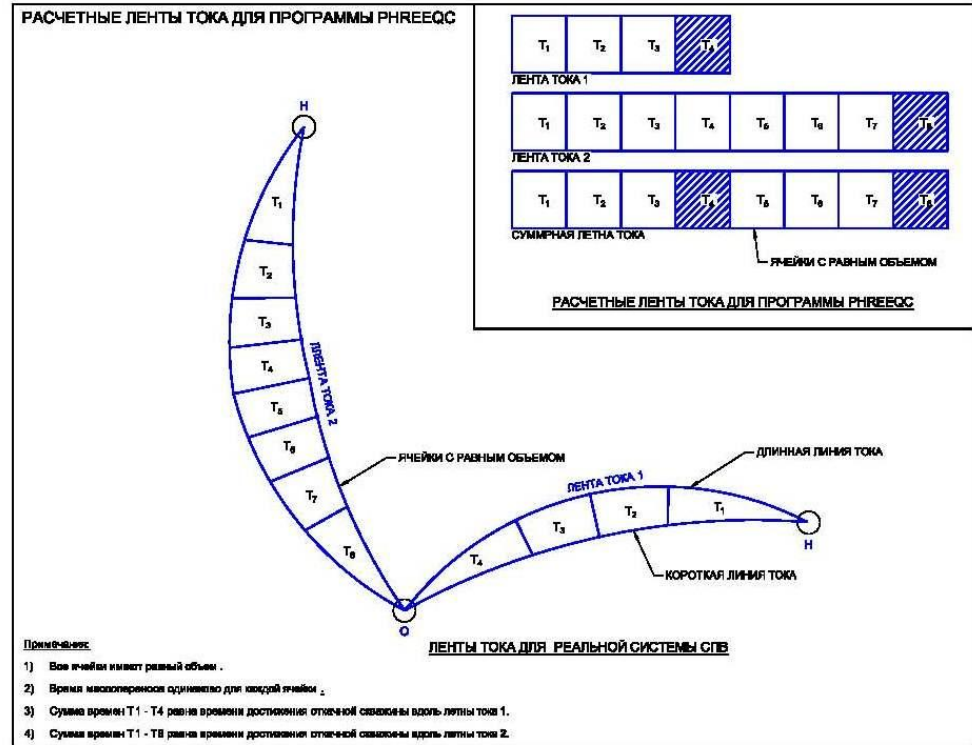
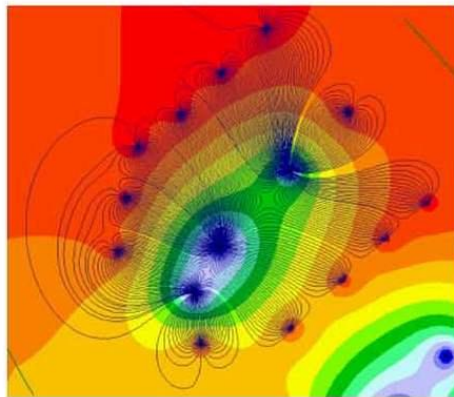
где: si (goethite) – индекс насыщения для гётита



# Использование лент тока в модели массопереноса PHREEQC

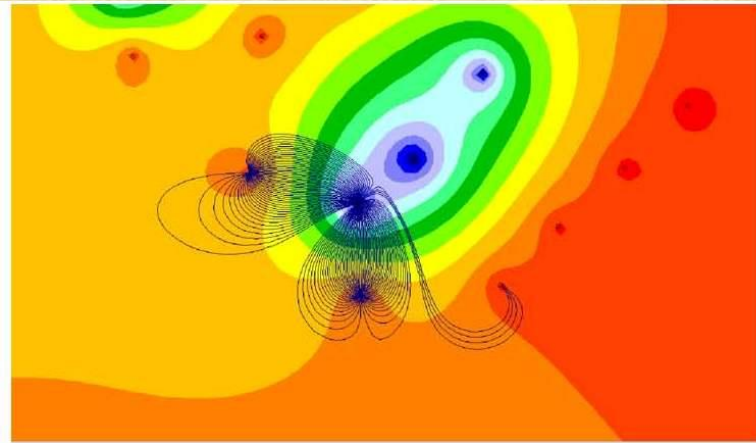


Процент продуктивного раствора в откачной скважине в зависимости от времени

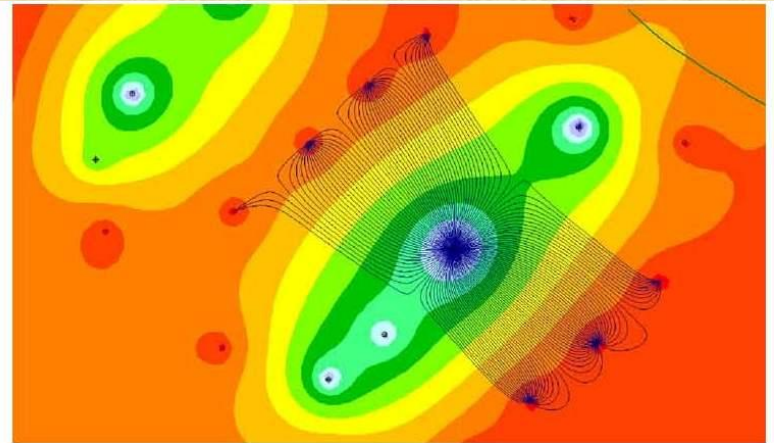




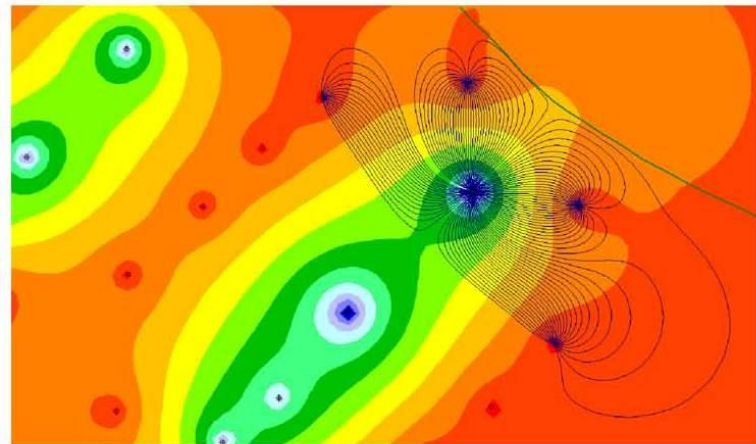
# Пример расчета линий тока к скважинам блока №1



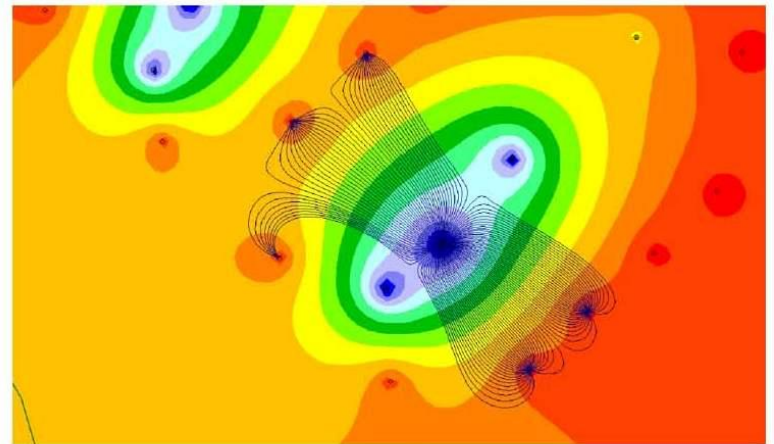
СКВАЖИНА № 18



СКВАЖИНА № 19



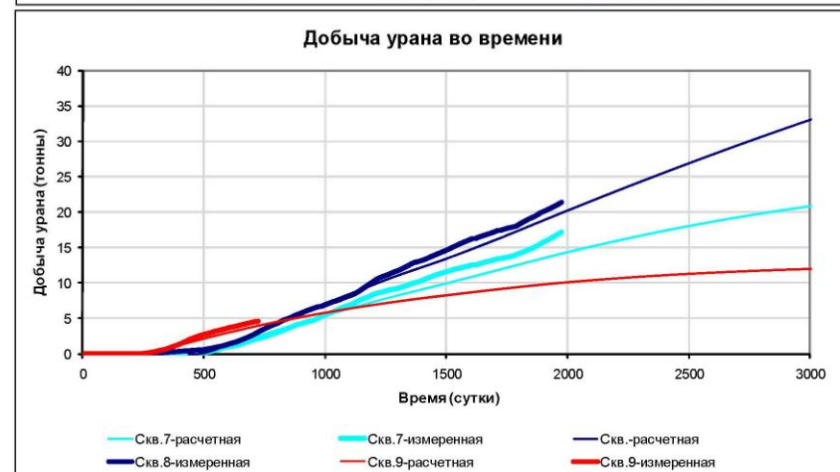
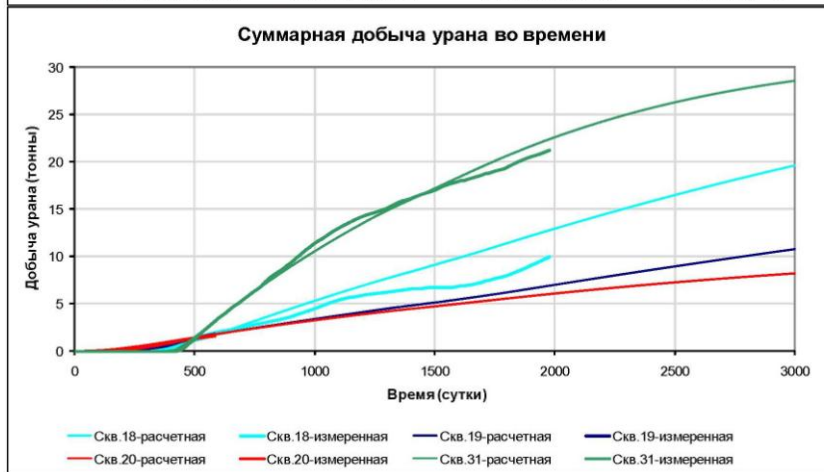
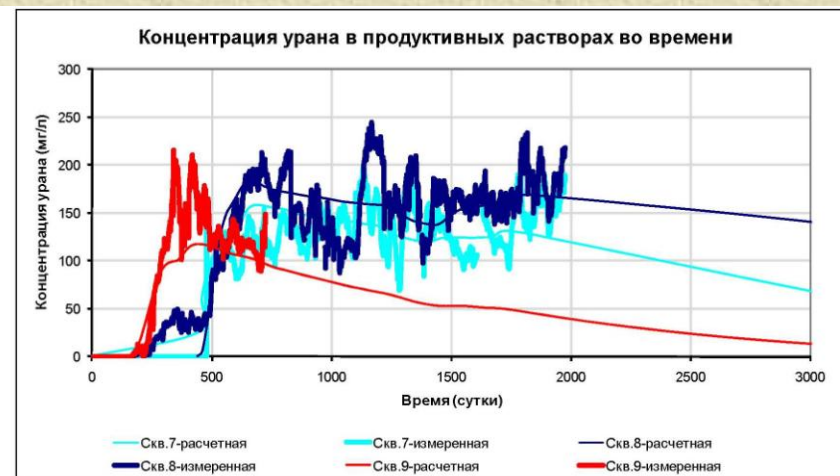
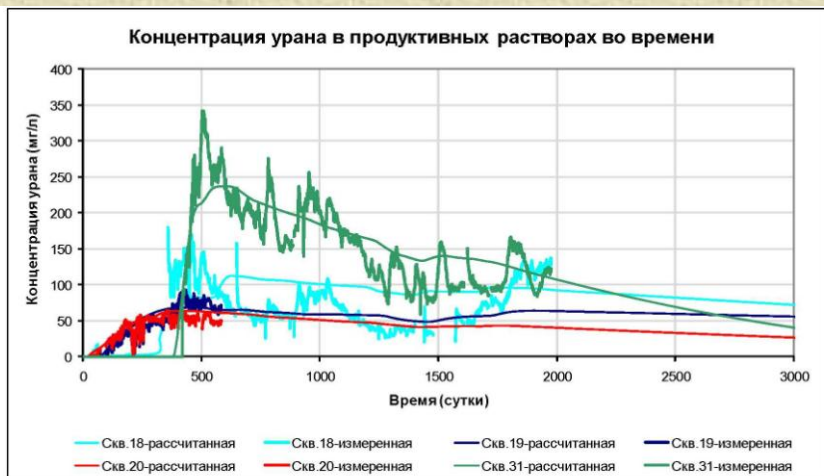
СКВАЖИНА № 20



СКВАЖИНА № 31

Цветом показаны расчетные гидравлические напоры

# Результаты калибровки модели по блокам 1 и 2



Определены геохимические параметры:

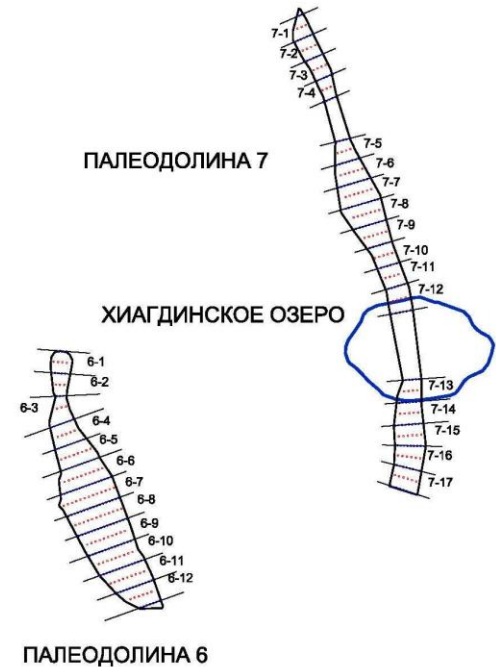
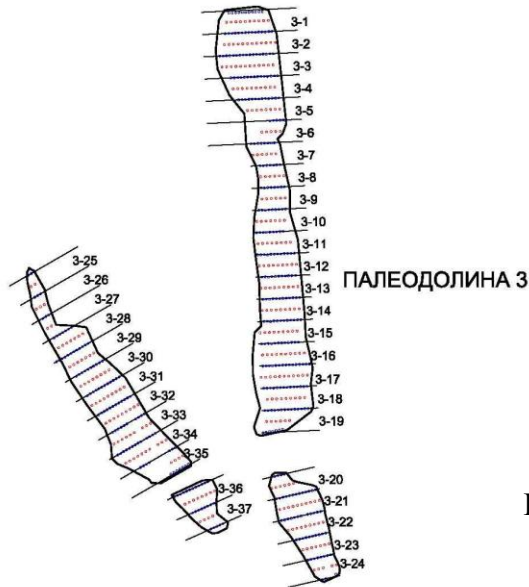
$K_r$  для  $UO_2$ ,  $FeS_2$  и  $FeO(OH)$ ;  
 $A_0/v$  для  $UO_2$ ,  $FeS_2$  и  $FeO(OH)$ ;  
 $m/m_0$  экспонента для  $UO_2$ ,  $FeS_2$  и  $FeO(OH)$ ;  
 величина, обратная  $m_0$  для  $UO_2$ ,  $FeS_2$  и  $FeO(OH)$ ;  
 параметр катионного обмена  $K_x$  для  $UO_2^{+2}$ ,  $H^+$  и  $Fe^{+2}$ .



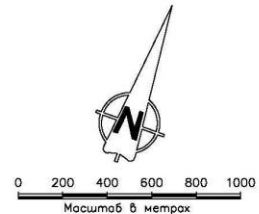
# Распределение расчетных блоков в палеодолинах 3, 5, 6 и 7

## УСЛОВНЫЕ ОБОЗНАЧЕНИЯ

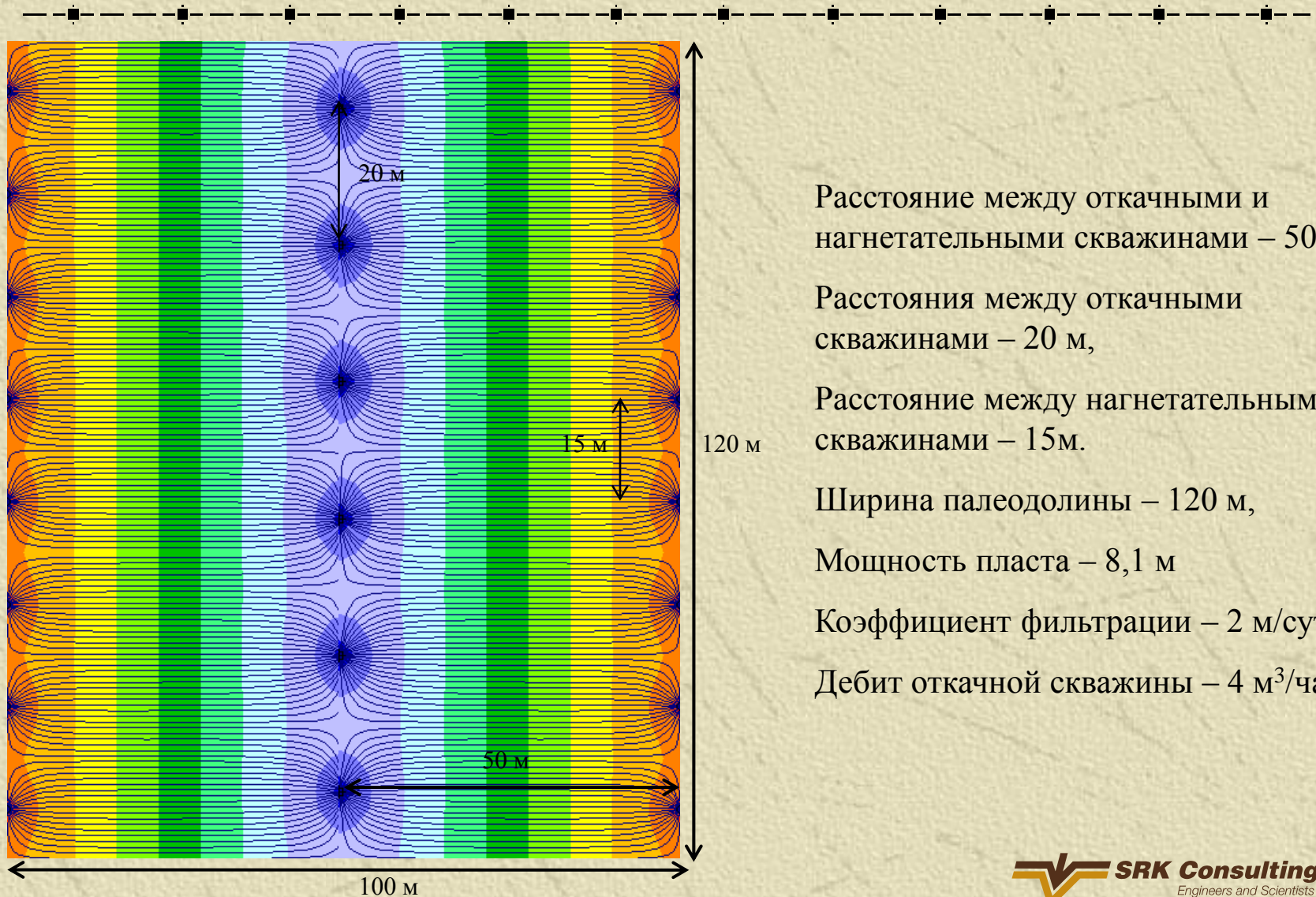
- ОТКАЧНАЯ СКВАЖИНА
- НАГНЕТАТЕЛЬНАЯ СКВАЖИНА
- ГРАНИЦА РАСЧЕТНОГО БЛОКА
- 6-3 НОМЕР РАСЧЕТНОГО БЛОКА



Продуктивность залежи для каждого расчетного блока была определена на основе 3-х мерной блочной геологической модели. Их величины изменялись от 1,9 до 25,4 кг/м<sup>2</sup>.



# Рассчитанные линии тока для прогнозного линейного блока



Расстояние между откачными и нагнетательными скважинами – 50 м,

Расстояния между откачными скважинами – 20 м,

Расстояние между нагнетательными скважинами – 15 м.

Ширина палеодолины – 120 м,

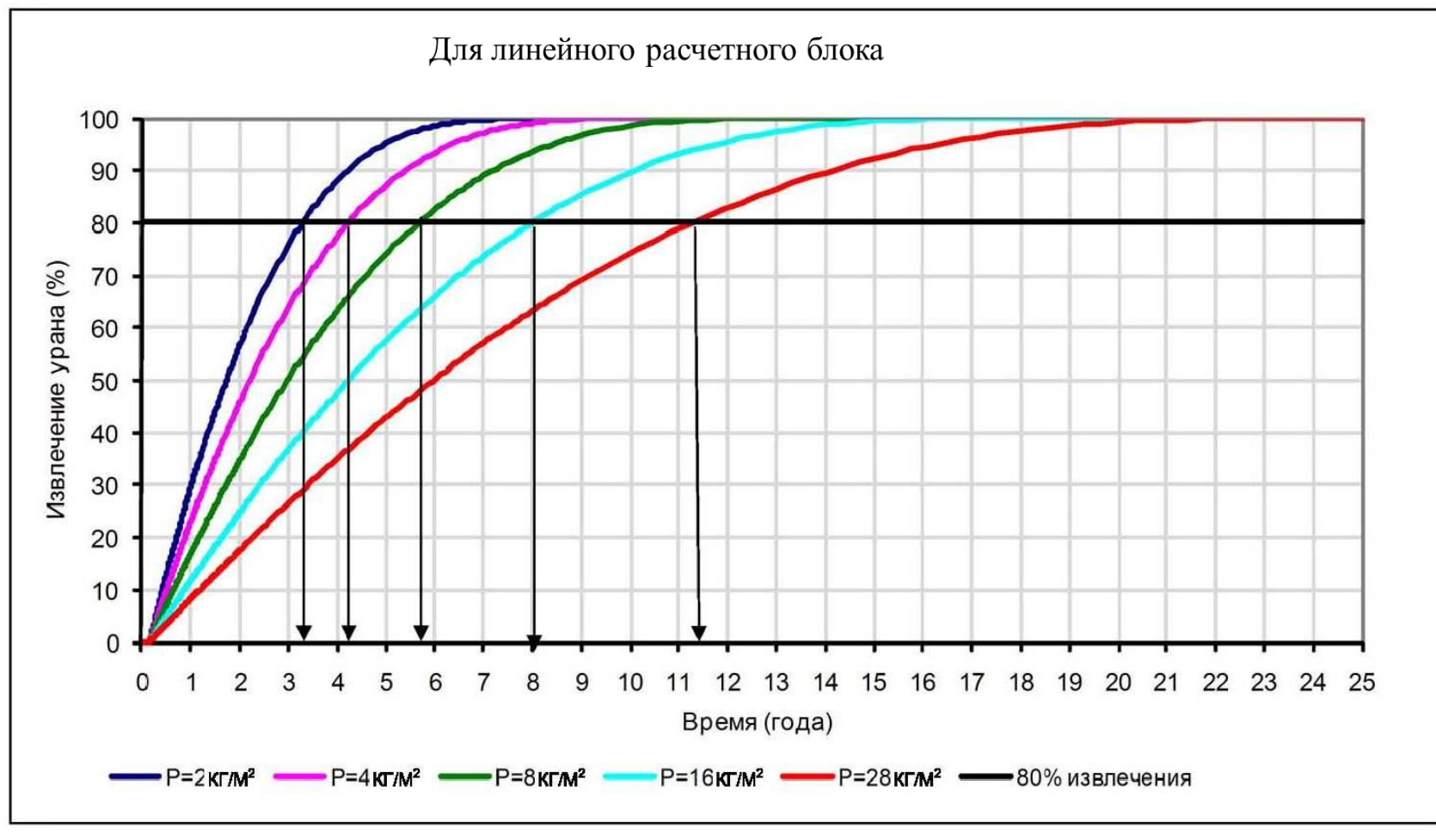
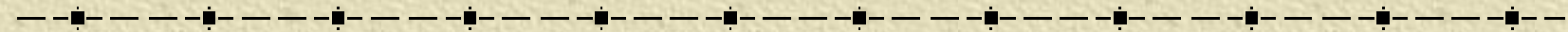
Мощность пласта – 8,1 м

Коэффициент фильтрации – 2 м/сут

Дебит откачной скважины – 4 м<sup>3</sup>/час

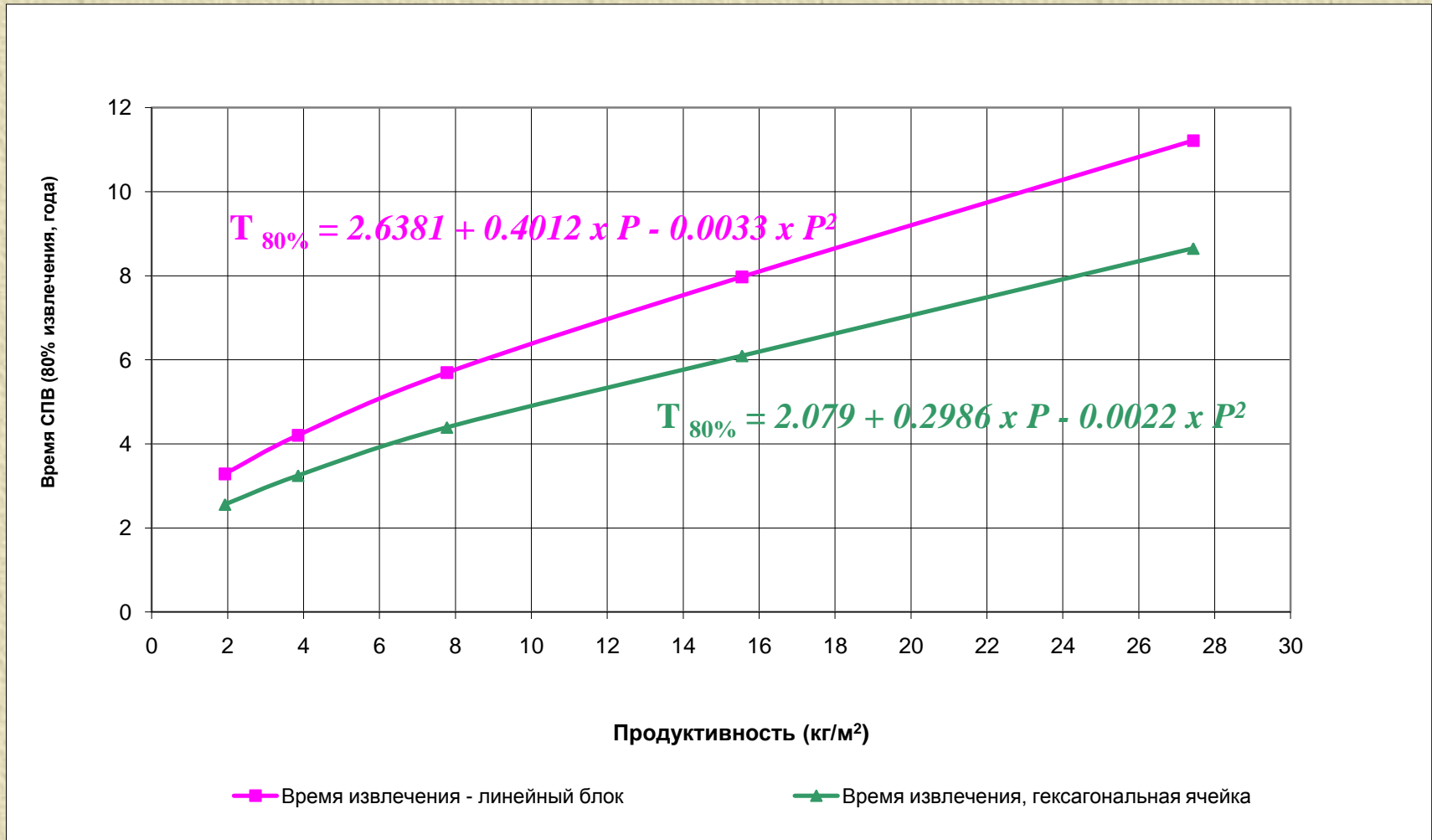


# Зависимость процента извлечения урана от продуктивности залежи и времени



Такая же зависимость получена для гексагонального блока радиусом 36 м.

# Зависимость времени 80% извлечения урана от продуктивности залежи



Время 80-ти процентного извлечения урана для каждого блока варьируется в зависимости от продуктивности от 3,4 года до 10,7 лет



# Расчет годовой добычи урана и средней концентрации урана в выщелачивающих растворах

$$P \times A \times 0.8$$

$$U_{\text{год}} = \frac{P \times A \times 0.8}{t_{80\%}} \quad (1)$$

где:

$U$  – годовая добыча урана из блока, кг/год (варьируется от 2 до 40 тон/год)

$P$  – продуктивность в блоке, рассчитываемая на основе 3-D геологической блочной модели для подсчета запасов, кг/м<sup>2</sup>

$A$  – площадь блока, м<sup>2</sup>

$t_{80\%}$  – время 80% извлечения урана, года

$$U_{\text{год}} \times 1000$$

$$C_{\text{ср}} = \frac{U_{\text{год}} \times 1000}{n \times Q \times 24 \times 365} \quad (2)$$

$$n \times Q \times 24 \times 365$$

где:

$C_{\text{ср}}$  – средняя концентрация урана из блока, мг/л (усредненная во времени и по месторождению варьируется от 40 до 120 мг/л)

$n$  – число откачных скважин

$Q$  – дебит откачной скважины, м<sup>3</sup>/час

# Пример расчета добыча урана из четырех палеодолин

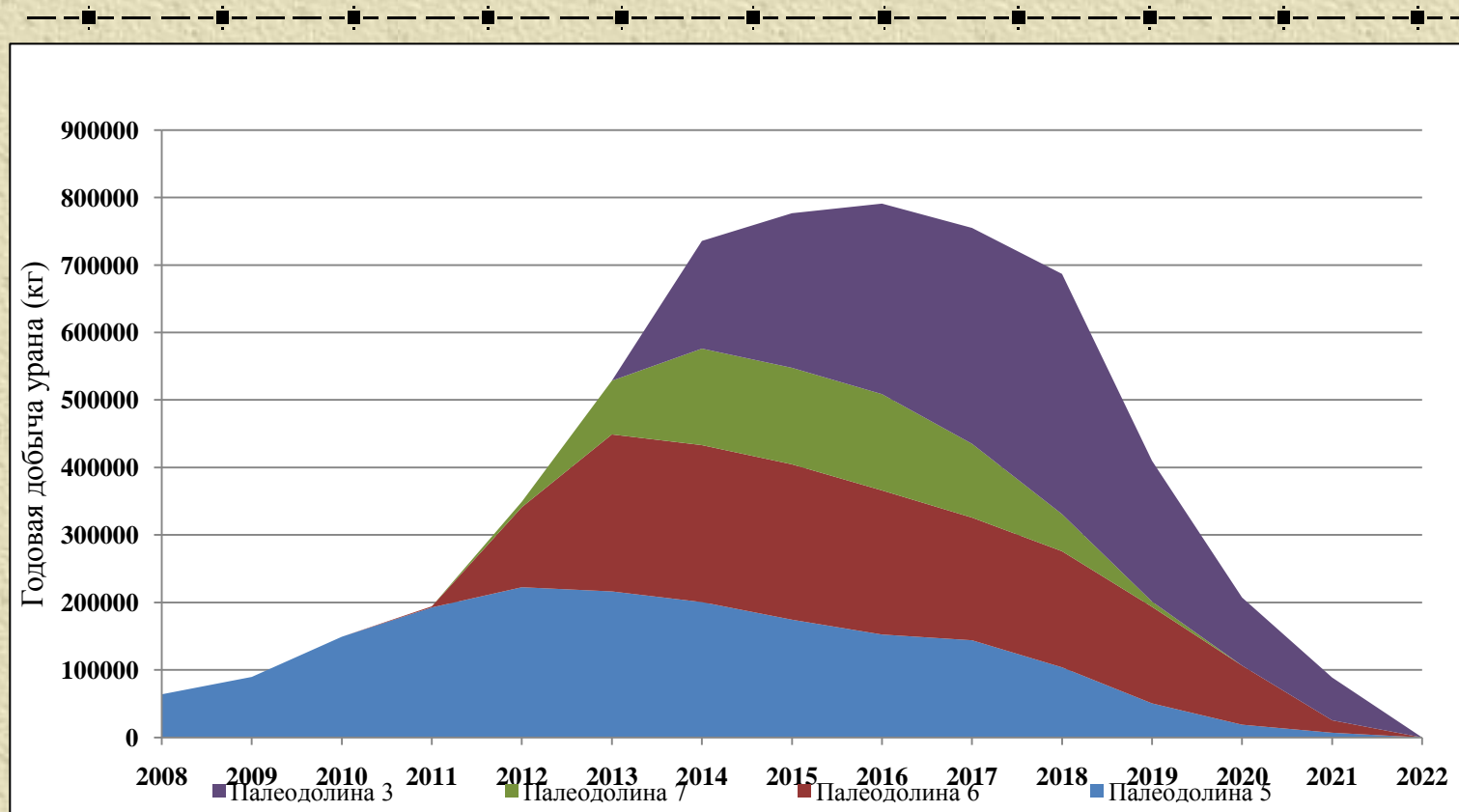


График добычи урана был разработан для всего месторождения на основе ежегодного извлечения урана из каждого расчетного блока с учетом:

- целевой суммарной добычи,
- производительности фабрики по обогащению продуктивных растворов и
- требований к концентрации урана в этих растворах.



# Заключение

- Геотехнологическое моделирование, представленное в докладе, может быть применено как для сернокислотного выщелачивания, применяемого в России и Казахстане, так и к процессам щелочного СПВ, широко распространенного в Соединенных Штатах.
- Предлагаемый модельный подход может быть использован для:
  - обоснования разработки месторождения на начальном этапе,
  - проектирования системы откачных и нагнетательных скважин,
  - прогнозирования эксплуатационных параметров системы СПВ,
  - прогноза времени извлечения урана из отдельных блоков или частей месторождения и
  - обоснования графика добычи и оптимизации скважинных полигонов для улучшения экономических показателей освоения месторождения.
- Кроме того, подобный модельный подход может спрогнозировать и помочь в оптимизации процесса рекультивации водоносного горизонта после завершения добычи урана на основе анализа реакций, происходящих в процессе восстановления первоначальных свойств горизонта.
- Если геотехническая модель разработана на начальном этапе освоения месторождения, ее прогнозирующая способность будет увеличиваться во времени, создавая динамический инструмент для эффективного продолжения эксплуатации объекта СПВ.