

# **МОДЕЛИРОВАНИЕ ЗАДАЧ ТЕПЛОМАССОПЕРЕНОСА В ТЕХНИЧЕСКИХ СИСТЕМАХ, ЭКСПЛУАТИРУЕМЫХ В ЭКСТРЕМАЛЬНЫХ УСЛОВИЯХ**

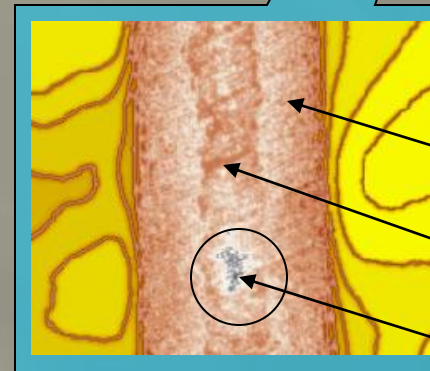
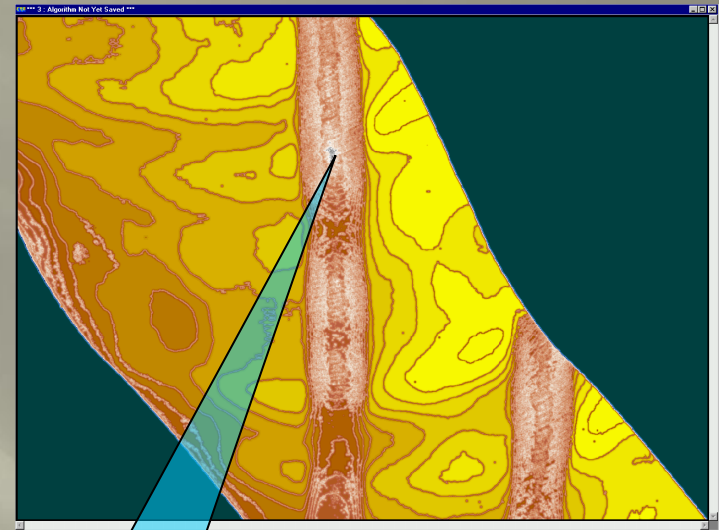
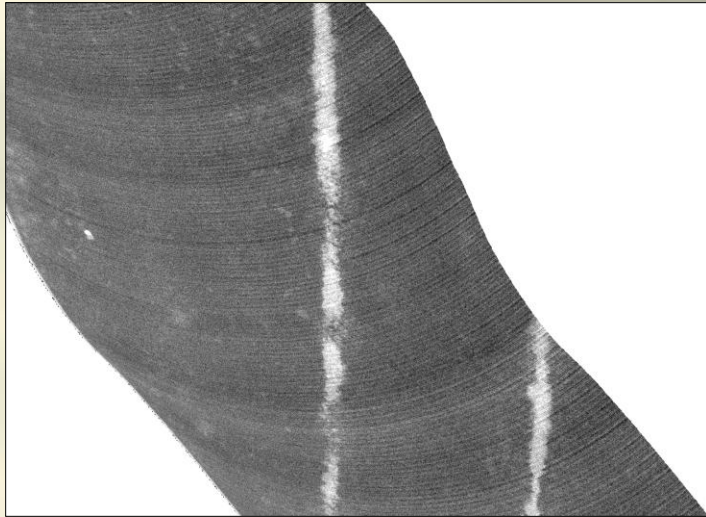
**М.Ю.Филимонов, Н.А.Ваганова  
(ИММ УрО РАН, УрФУ, г.Екатеринбург)**

**Абрау-Дюрсо, 17 сентября 2015 г.**

# План доклада

1. История возникновения задач.
2. Моделирование различных технических систем, функционирующих на северных нефтегазовых месторождениях.
3. Моделирование функционирования геотермальных систем.
4. Заключение. Выводы.

# ОБРАБОТАННЫЙ СНИМОК



Тепловой след траншеи

Газовая труба

Тепловое проявление нарушения изоляции

## Полезная нагрузка на БПЛА типа ZALA-421-12. Тепловизор



**1** Модуль тепловизора



**2** Установочный блок тепловизора



**3** Место установки блока тепловизора на БПЛА

Пример стоп-кадра  
видеоизображения тепловизора с  
координатной привязкой

**4**

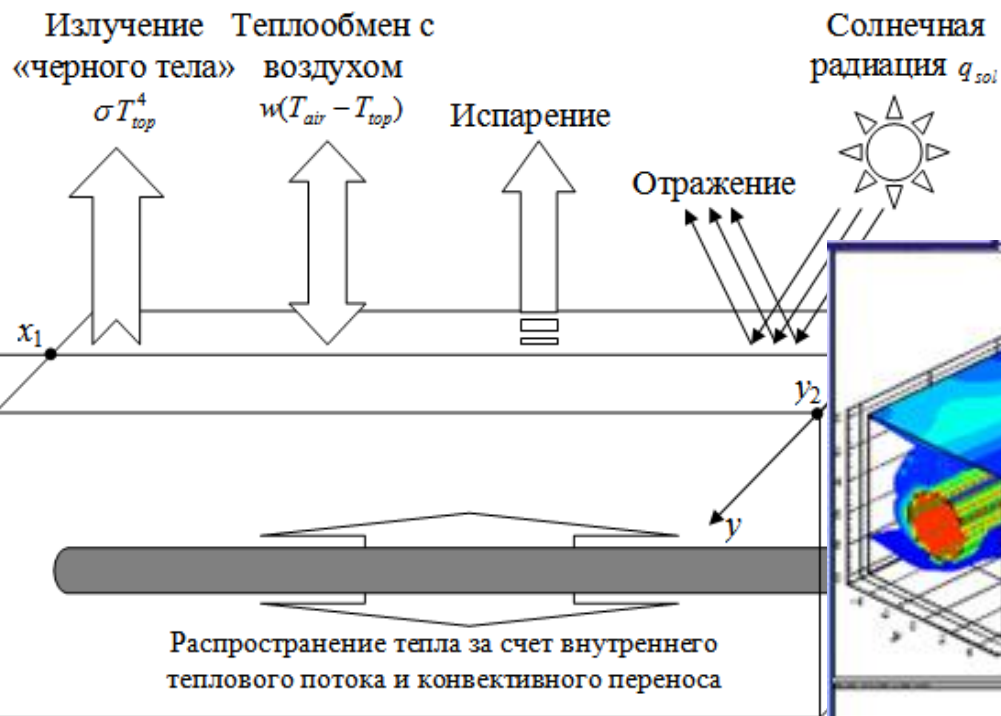


Детектор	Неохлаждаемый болометр
Формат матрицы	600
Спектральный диапазон, мкм	3,6
Частота кадров, 1/сек	0,003
Интервал рабочих температур, С	12
Размеры, мм	30
Масса, г	32 x 32
Объектив	14,2 мм, поле зрения 47°

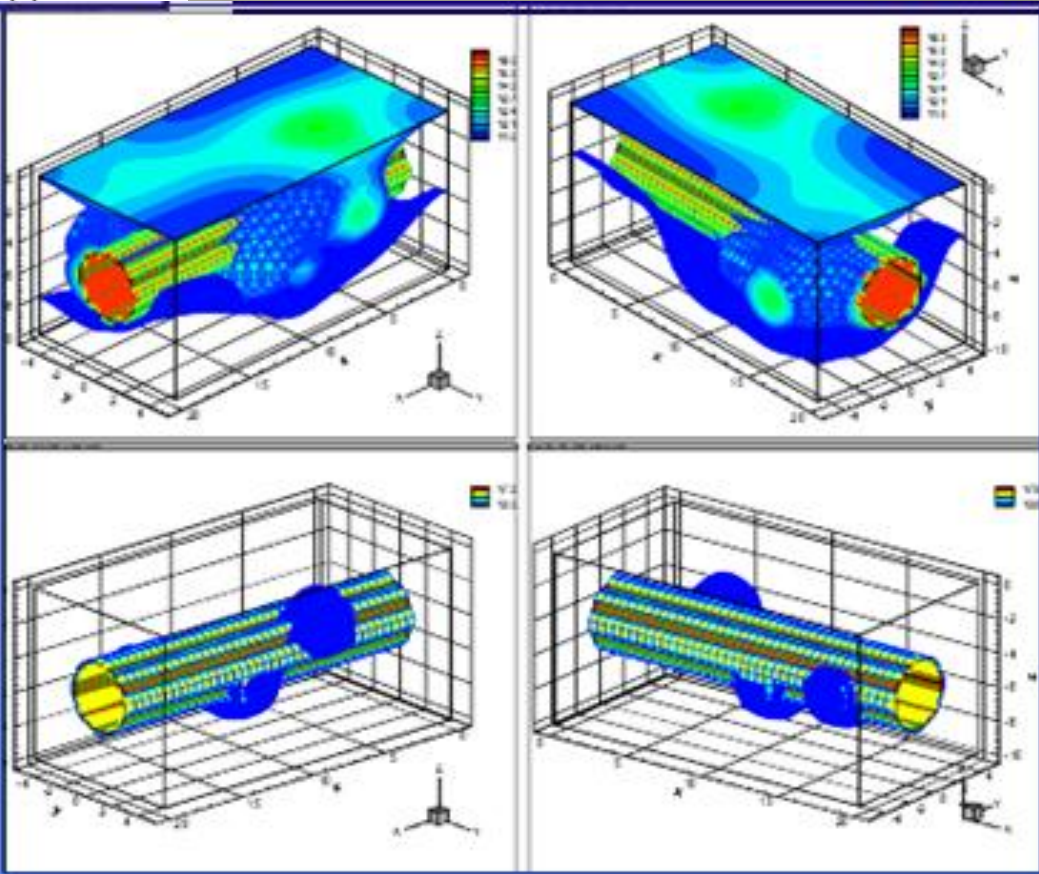
# Съёмка местности с БПЛА



# Тепловые поля от поврежденного трубопровода

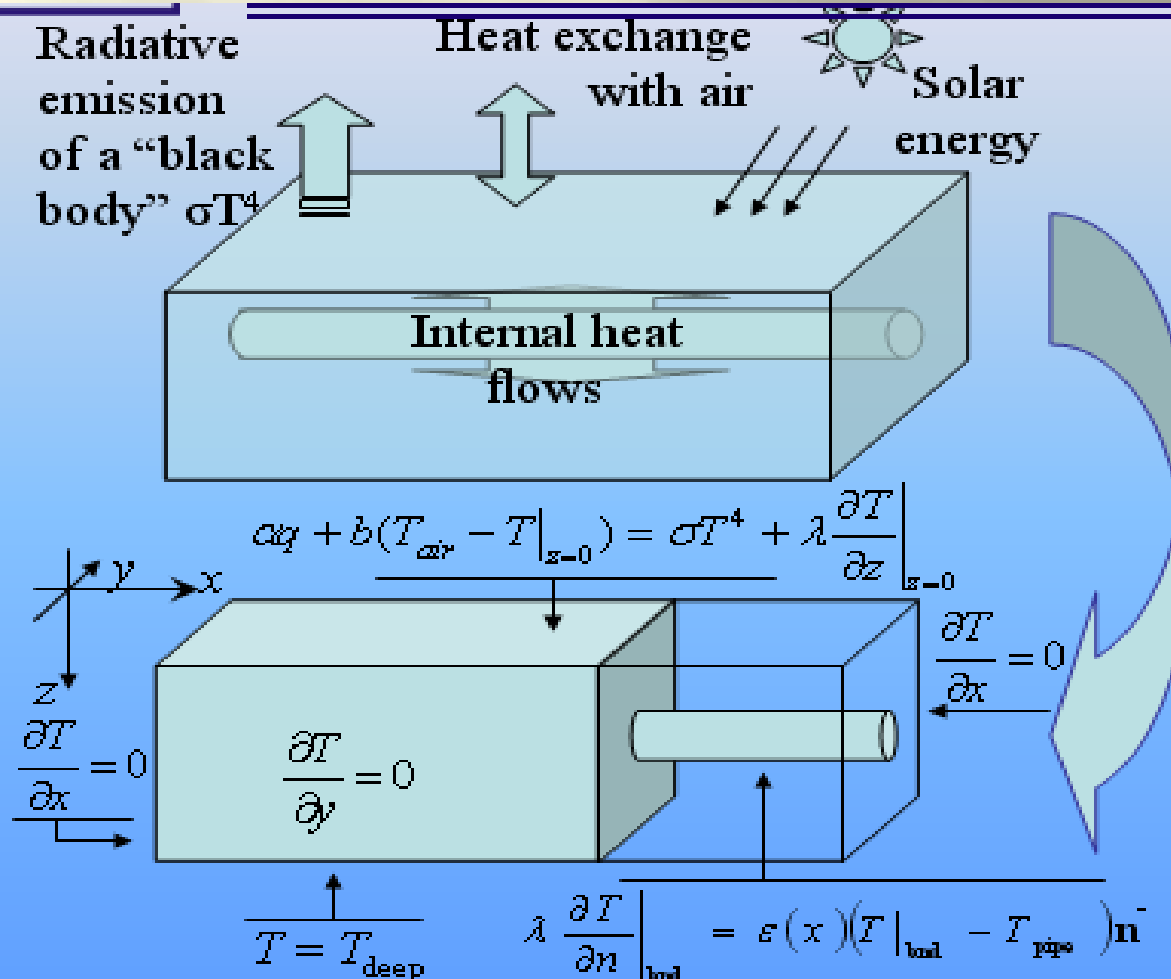


Физическая модель



Рассчитанные тепловые поля

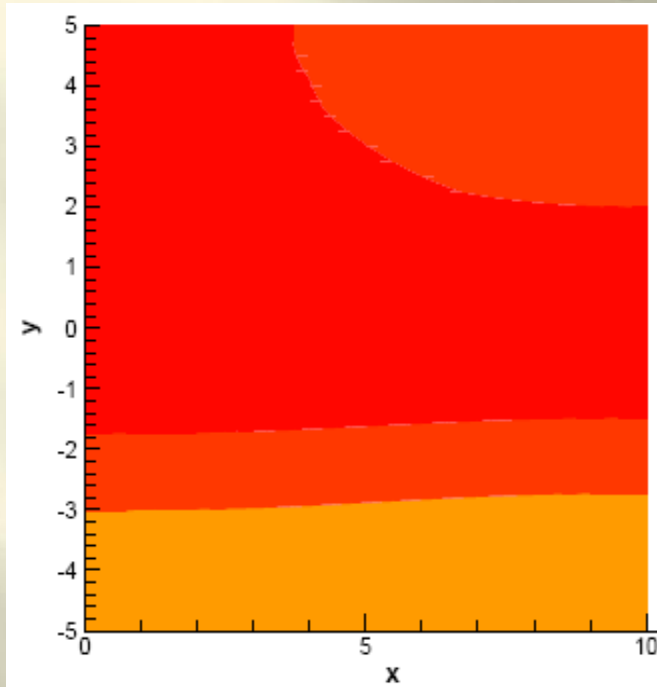
# Тепловые потоки



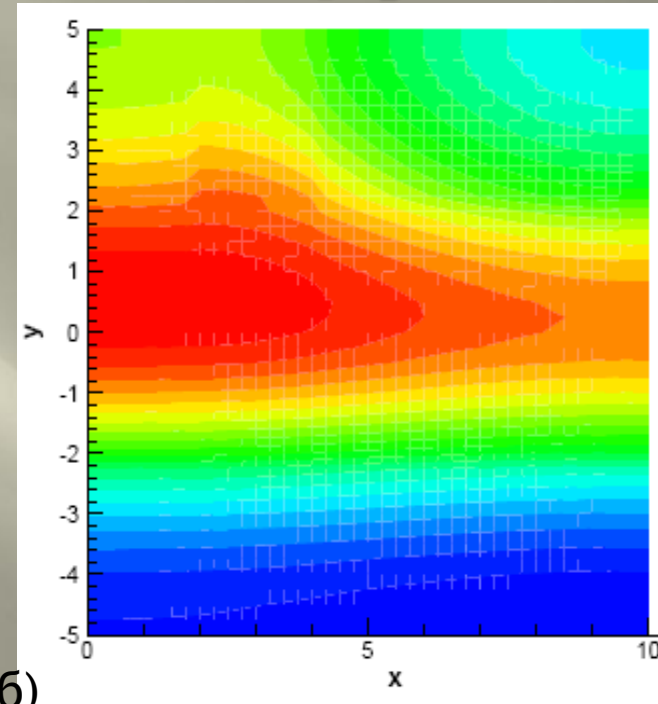
Consider a problem of thermal diffusivity from heated and isolated pipeline. Heat flow from the pipeline is proportional to difference of ground and pipeline temperature, and the coefficient is essentially increase at places where the isolating shell has wear.  $T(t, x, y, z)$  – temperature distribution. The problem is described by a diffusivity equation

$$\frac{\partial T}{\partial t} = \lambda \left( \frac{\partial^2 T}{\partial x^2} + \frac{\partial^2 T}{\partial y^2} + \frac{\partial^2 T}{\partial z^2} \right)$$

# Сравнение температурного поля на поверхности грунта



(a)



(б)

Сравнение температурного поля на поверхности грунта, освещенного солнцем (а), и неосвещенного солнцем (б).



# Температурные поля для на неровной дневной поверхности

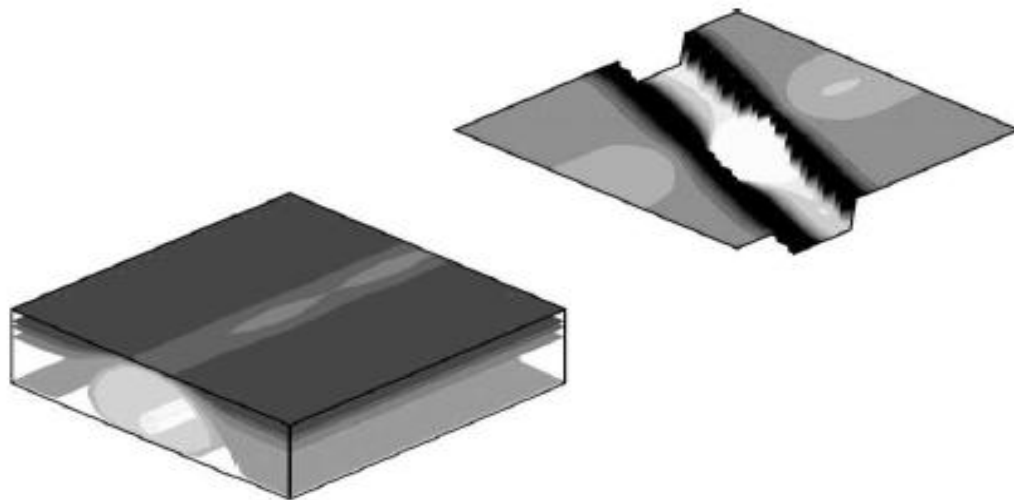


Рис. 1: Temperature on the earth surface for non-uniform heat source

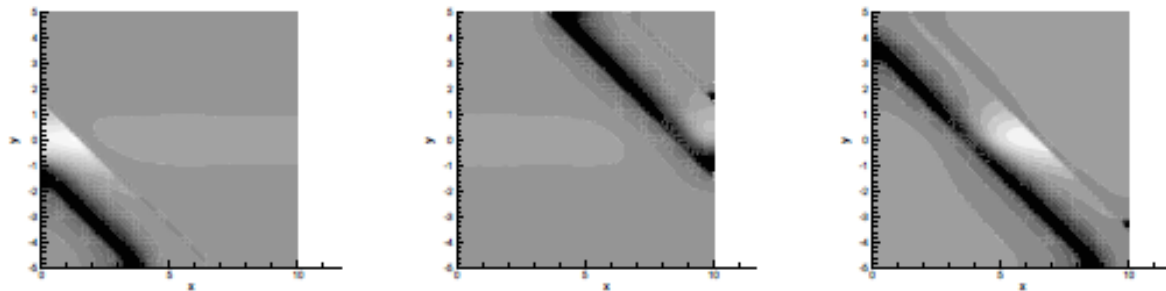
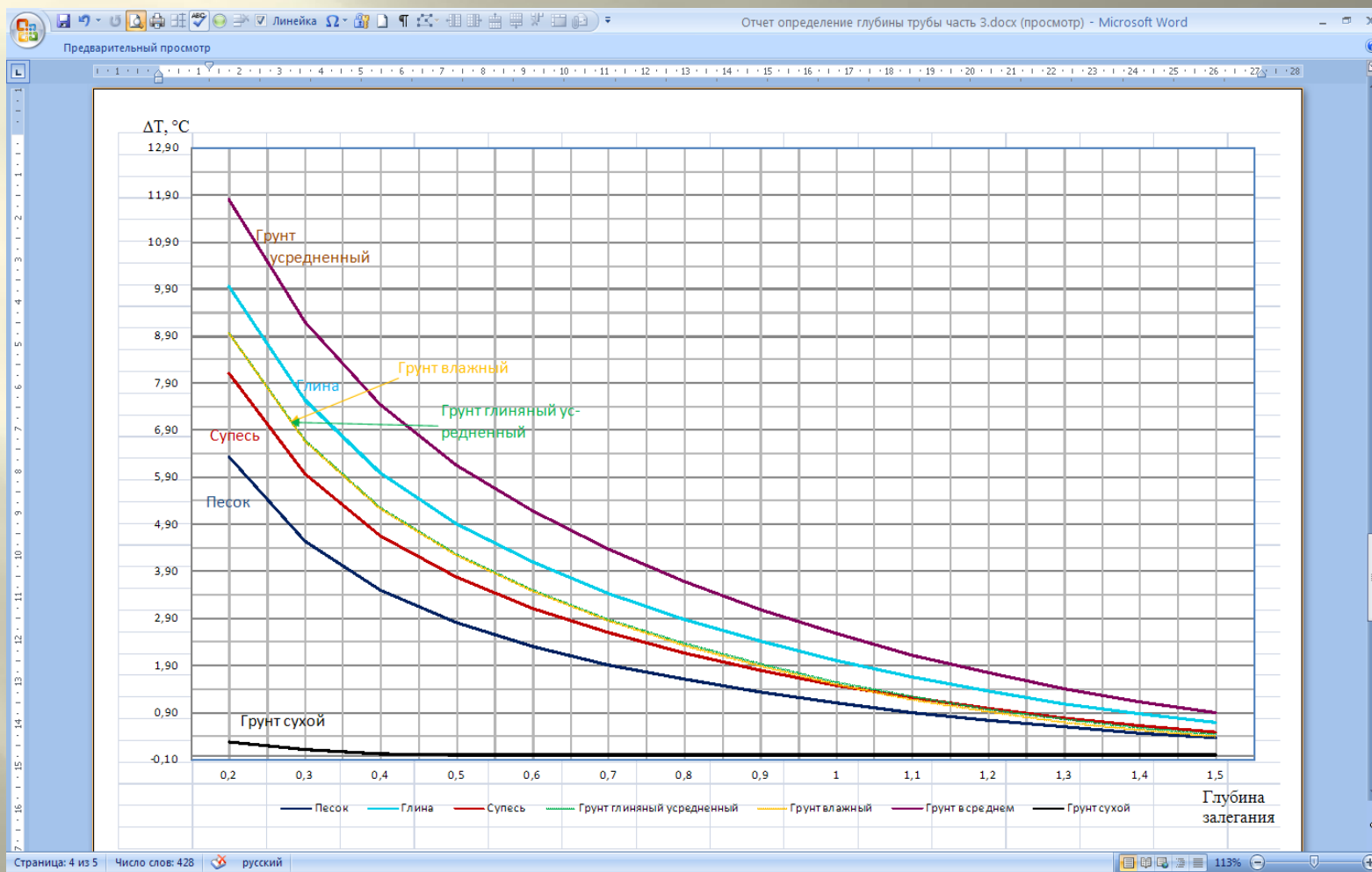


Рис. 2: Temperature on the earth surface for different channels

# Зависимость амплитуды теплового следа от глубины залегания трубы



# Определение глубины залегания трубы по тепловому следу

- $T_A = T_0 + \frac{\lambda \Delta T}{h_0} - 2 \sqrt{\frac{\lambda \sigma T_0^3}{h_0}}$
- где  $T_A$  – амплитуда теплового следа,
  - $T_0$  – температура на поверхности,
  - $\lambda$  – теплопроводность,
  - $h_0$  – расстояние от верхнего края трубы до поверхности,
  - $\Delta T$  – разница температуры на поверхности и температуры трубы,
  - $\sigma$  – постоянная Больцмана.

# Результаты численных расчетов и диагностика целостности трубопроводов по тепловым полям

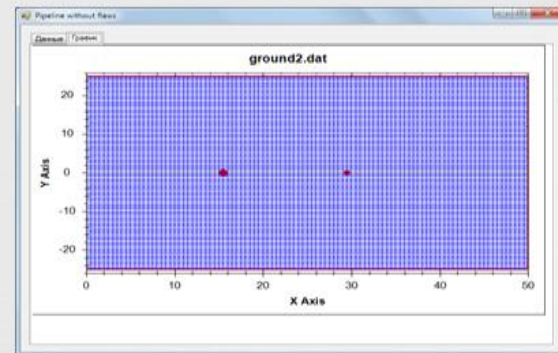
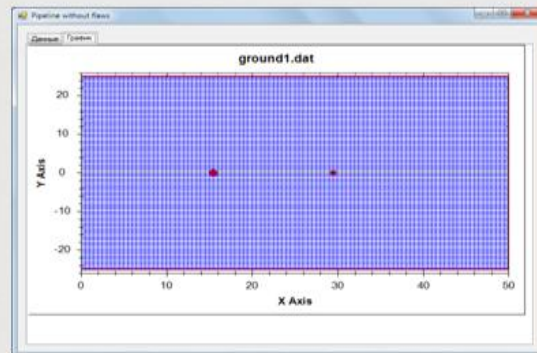
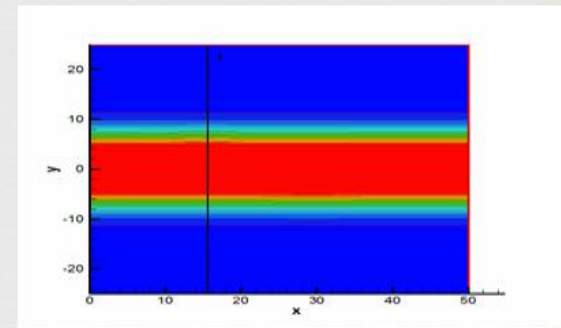
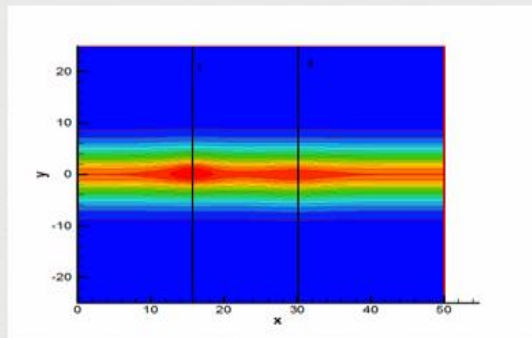


Рис. 1

Рис. 2

# Литература по диагностике заглубленного трубопроводу

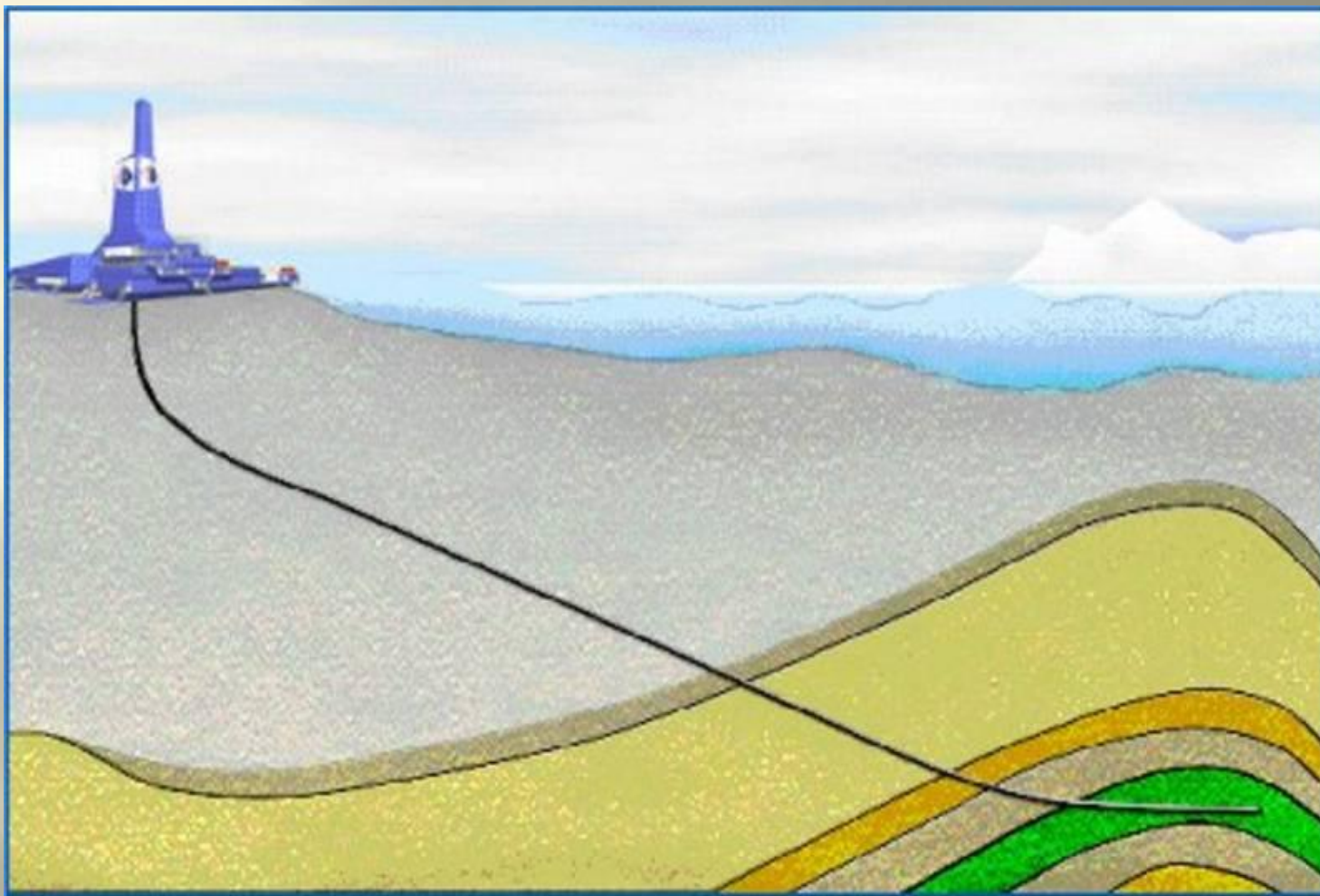
1. Ваганова Н.А. Численно-аналитическое моделирование нелинейных процессов для нестационарных задач механики сплошной среды // Диссертация канд. физ.-мат. Наук. Екатеринбург. 2007г.

2. *Vaganova N.A. Existence of a Solution of an Initial-Boundary Value Difference Problem for a Linear Heat Equation with a Nonlinear Boundary Condition // Proc. Steklov Inst. Math.- 2008.- Suppl. 1.- P. S260-S271. DOI:10.1134/S0081543808050209;*

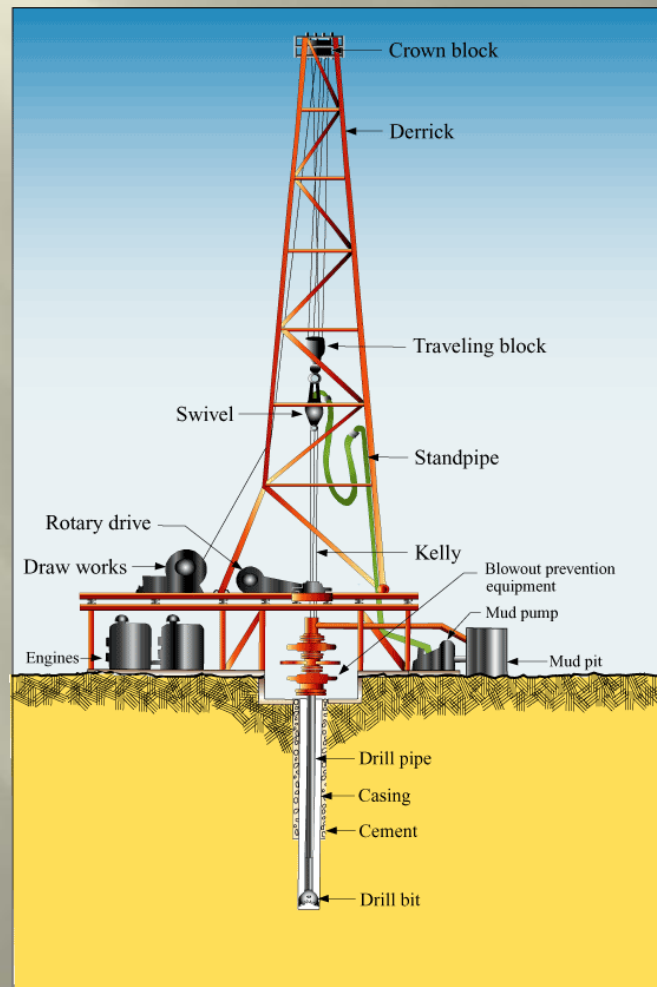
3. Башуров, Вл.В., Н.А. Ваганова, Филимонов М.Ю. Численное моделирование процессов теплообмена в грунте с учетом фильтрации жидкости // Вычислительные технологии. 2011. Т. 16, № 4. С. 3-18.

4. Vaganova N. Mathematical model of testing of pipeline integrity by thermal fields // AIP Conf. Proc. 2014. Vol. 1631. P. 218-224. DOI: 10.1063/1.4902455.

# 1.1 Схема добычи нефти в обычных условиях

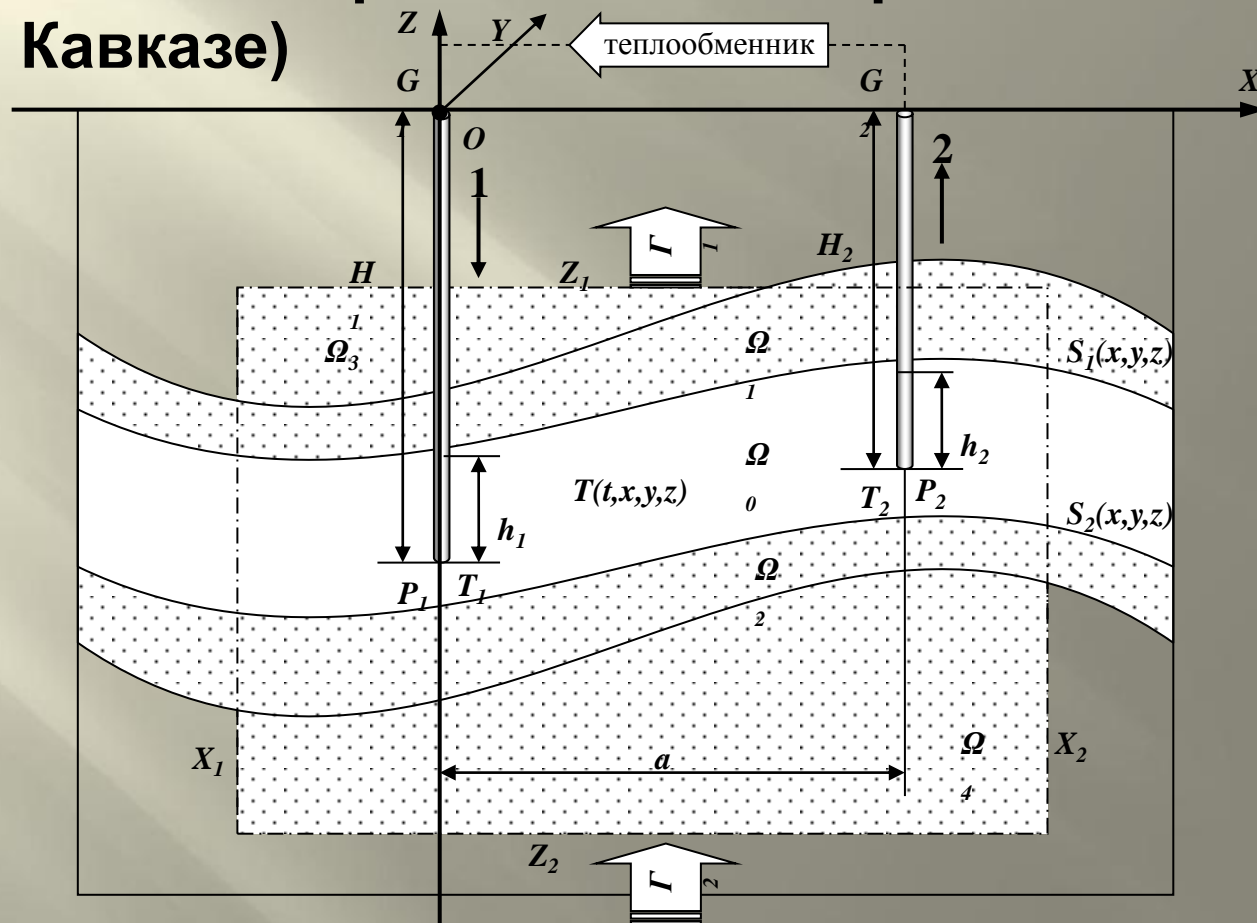


# Разработка нефтегазовых месторождений в зоне вечной мерзлоты (с 2010 г.)



# Моделирования распределения температуры в пределах резервуара геотермальных вод (С 2013 г.)

(Ханкалийское геотермальное месторождение на Северном Кавказе)





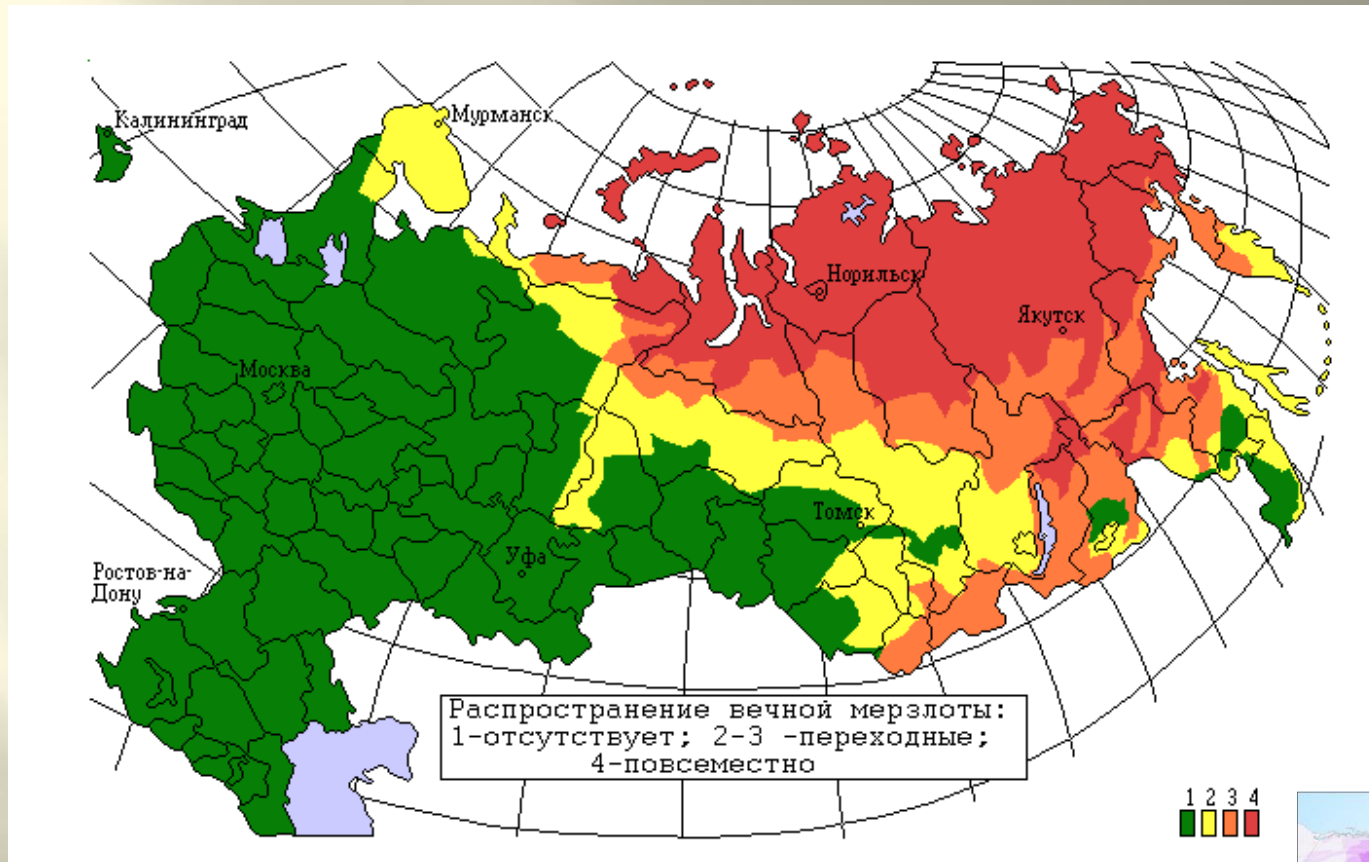
**Определение. Многолетнемерзлыми породами (ММП) называются породы, сохраняющие отрицательную температуру, не менее 2-х лет**



**М.В. Ломоносов в работе**

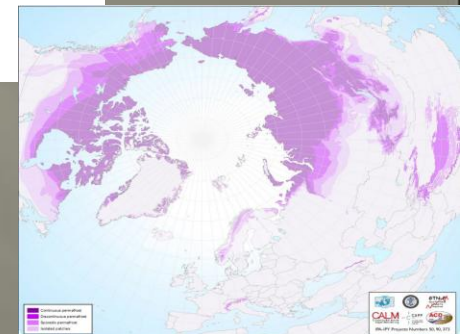
"Слово о рождении металлов от трясения земли"(1757) объяснил существование **«земли, замерзшей даже летом на глубине ниже тонкого талого слоя в местах, близких Северным морям и в высоких горах, отделяющих Сибирь от Китайской империи»** суровостью климата и близостью к **«холодным атмосферным слоям»**. Он писал о том, что в обоих случаях **«зимний холод побеждает летнее тепло»**, **что в целом соответствует современным представлениям о тепловом балансе земной поверхности.**

# Распространение вечной мерзлоты в России



**ММП** занимают около **25%** всей суши земного шара. На Аляске эти территории занимают **80%** общей площади, в **России - 65%**, в Канаде - **50%**.

Высокогорные районы также могут находиться в зоне вечной мерзлоты. в Китае эти районы составляют **11%** всей территории, в Австрии - **2%**.



## Последствия растепления ММП

За 10 последних лет только в городах Норильского района вследствие уменьшения несущей способности фундаментов снесено около 50 многоэтажных домов. На территории Ямбургского газоконденсатного месторождения из-за морозного пучения в 2007 – 2009 г.г. срезано около **8 тысяч опор** для газопроводов. Подвергаются деформации около **40%** всех инженерных сооружений в криолитозоне.



Деформация сооружений



Обрушившаяся в результате ослабления фундамента секция здания в поселке Черский.



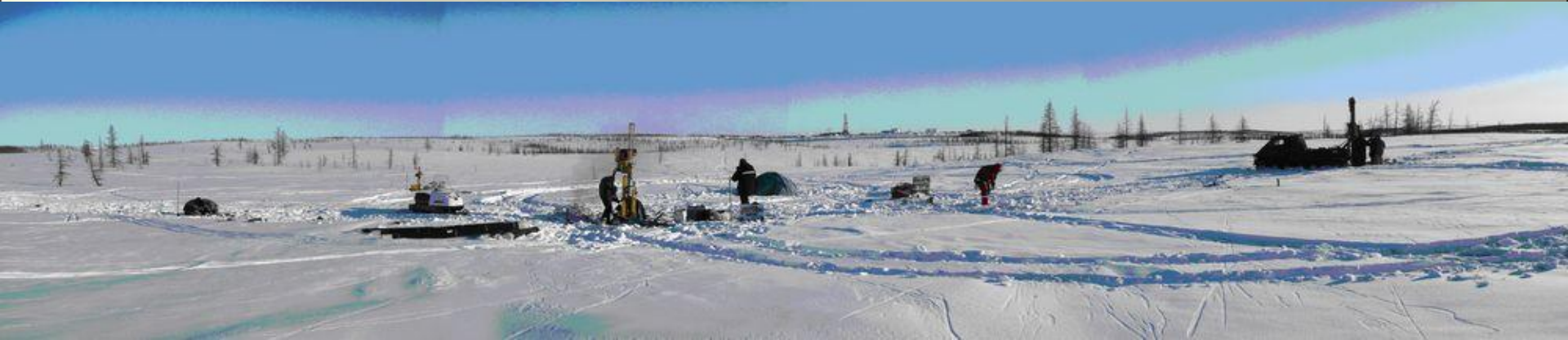
Tok Cutoff Highway

Деформация  
опор трубопровода  
Провал  
дороги

Деформация  
трубопровода



# Обустройство кустовых площадок в зоне ММП



В криолитозоне России добывается около **93% российского природного газа и 75% нефти**, (до **70%** экспорта страны).

Толщина **ММП** в этих зонах **от 10 до 800 м**.

*(Долгое время считалось, что максимальная глубина **ММП** составляет 600-700 м. Однако в северо-западной части Якутии бурением было установлено распространение **ММП** до глубины **1400 м**.)*

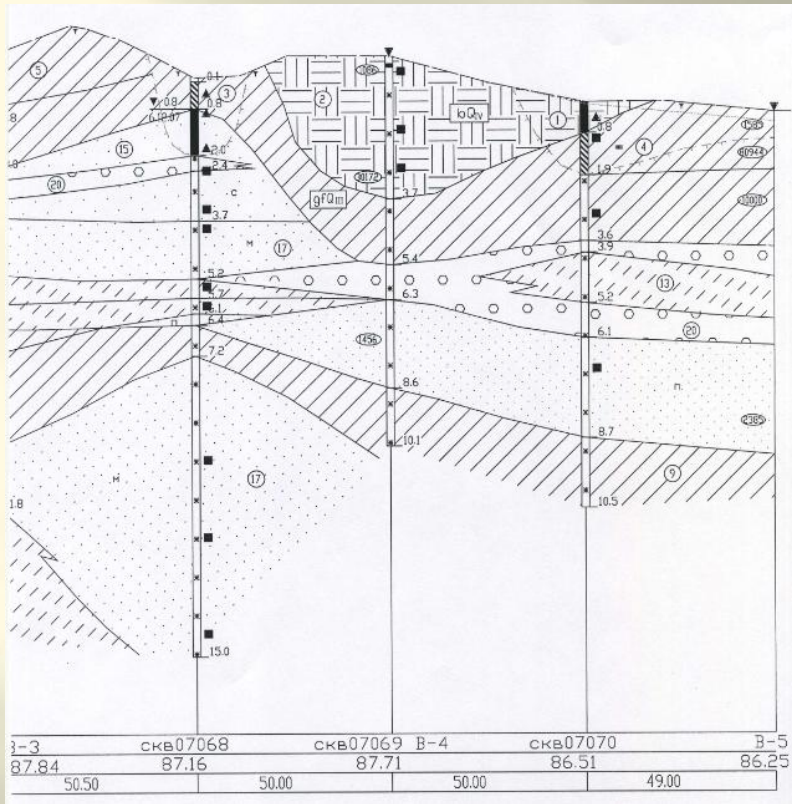
По зарубежным данным, Газпром ежегодно теряет более **1,9 млрд. долларов США** на восстановление инфраструктурных объектов, пострадавших в результате растепления **ММП**.

# Особенность добычи нефти и газа на кустовых площадках в зоне ММП

Освоение газовых и нефтяных месторождений в зонах распространения ММП, ведется методом кустового строительства скважин с размещением добывающих скважин с расстоянием **8 – 40 метров** на специальных площадках, отсыпанных песком. Толщина отсыпки кустовых площадок песком обычно составляет **1-2 метра**. **В случае слишком близкого расположения устьев скважин, при строительстве и дальнейшей их эксплуатации происходит активное растепление окружающих пород,** в результате чего происходят их просадки, обвалы, которые могут приводить к ряду осложнений и даже аварий в процессе бурения и эксплуатации скважин (стоимость одной скважины составляет в среднем **130-170 млн. рублей**).

**Существуют нормативные документы,** регламентирующие расстояния между скважинами, **однако для кустовых площадок различных месторождений необходимо в каждом случае рассчитывать радиусы протаивания для тепло и нетеплоизолированных конструкций, с учетом характеристик мерзлого разреза и температуры флюида.**

# ЭТАПЫ ОБУСТРОЙСТВА КУСТОВОЙ ПЛОЩАДКИ

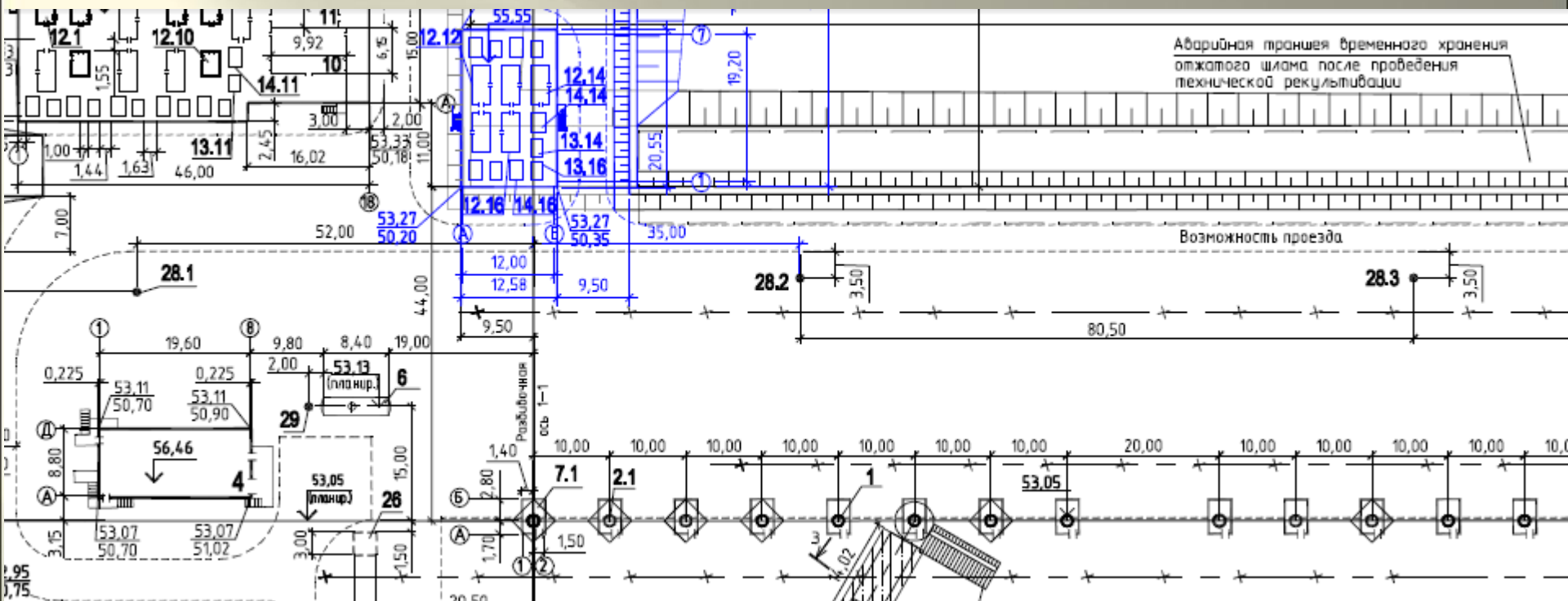


По результатам инженерно-геологических изысканий строится трехмерная модель разреза, для которой проводится 3D моделирование растепления.

Радиусы протаивания ММП можно рассчитать как скважин нетеплоизолированных, так и теплоизолированных конструкций.

Теплоизолированные конструкции добывающих нефтяных скважин при кустовом бурении месторождениях России в Западной Сибири и на Европейском севере пока не используются, за исключением отдельных опытных скважин. Поэтому, в отечественной практике разбуривание кустов добывающих из нетеплоизолированных скважин производилось при расстояниях между устьями **10 – 40 м**. На Заполярном и Ямбургском газовых месторождениях расстояния между кустовыми скважинам составляет **40 м**.

# Типичный генплан кустовой площадки



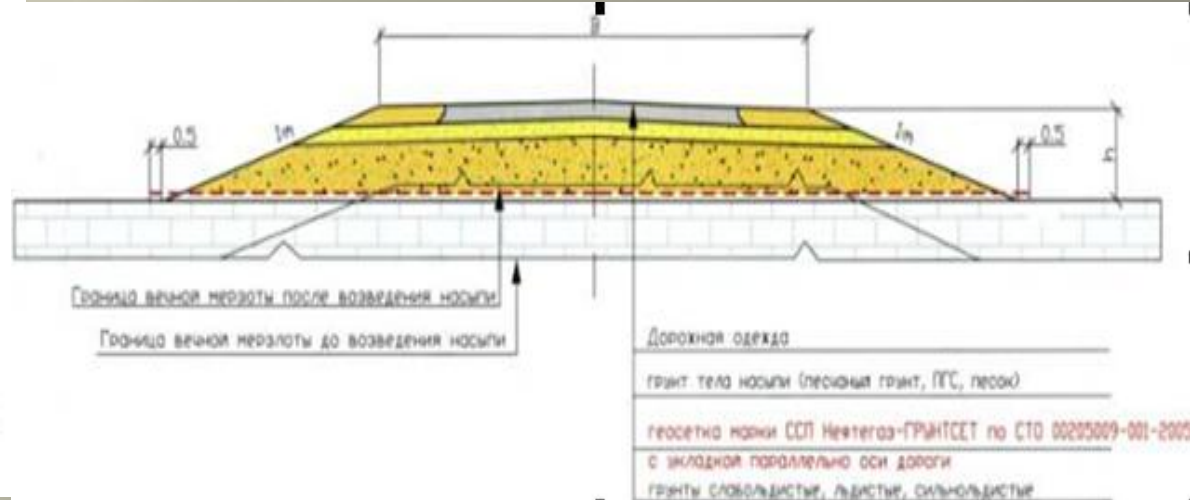
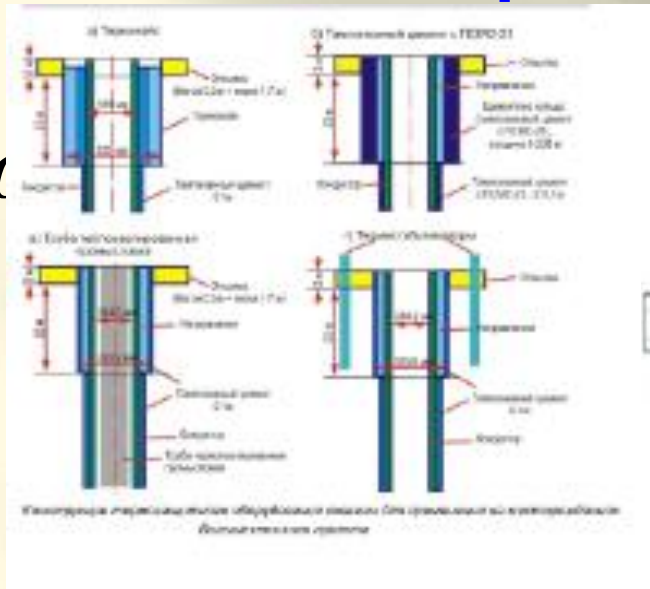
Ведомость объемов земляных масс

Наименование грунта	Количество м <sup>3</sup>		Примечание
	Насыпи (+)	Выемки (-)	
1. Грунт вертикальной планировки дополнительной площадки под энергетическое оборудование / площадки слопки пожарной техники	2562 / 1158	-	
2. Грунт на досылку пандусов	70	-	
3. Грунт для устройства пандуса на площадке ПС 35/6кВ	342	-	
4. Грунт для досылки оборудования площадки	111	-	
5. Грунт для заполнения объемной георешетки	16	-	
Всего:	4259	-	
6. Подработка: - на уплотнение грунта, k=0,05	213	-	
- на возведение насыпи с включением мерзлых коньков, k=0,03	135	-	
7. Подработка на потери грунта при транспортировке k=0,01	47	-	
8. Песок для абарийного зала	114	-	
Всего пригодного грунта	4768	-	
9. Недостаток пригодного грунта (из карьера)	-	4768	
Итого перерабатываемого грунта	4768	4768	

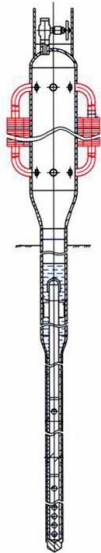
Экспликация зданий и сооружений

Номер по плану	Наименование	Координаты квадрата сетки
1	Устье добывающей скважины.	
2.1	Устье добывающей скважины (ЗЦН) с возможным переходом на водоагнетание	
3	Устье газоагнетательной скважины	
4	Блок технологический	
5	Блок дозирования метанола	
6	Дренажная емкость V=40м <sup>3</sup>	
7.1-7.14	Укрытие добывающей и с ЗЦН скважины с устьевым колодезем	
7.15-7.16	Укрытие газоагнетательной скважины с устьевым колодезем	
8	Блок-док ПКУ	
9	Мачта связи	
10	Блок КТП 6/0.4	
11	Блок НКУ	
12.1-12.16	Контейнеры с различными оборудованием	

# Некоторые инженерные конструкции на кустовых площадках



Различные конструкции скважин Отсыпка кустовой площадки



(СОУ)



Горизонтальные факельные установки (ГФУ) и вертикальные (ВФУ).

Сезоннодействующие охлаждающие устройства



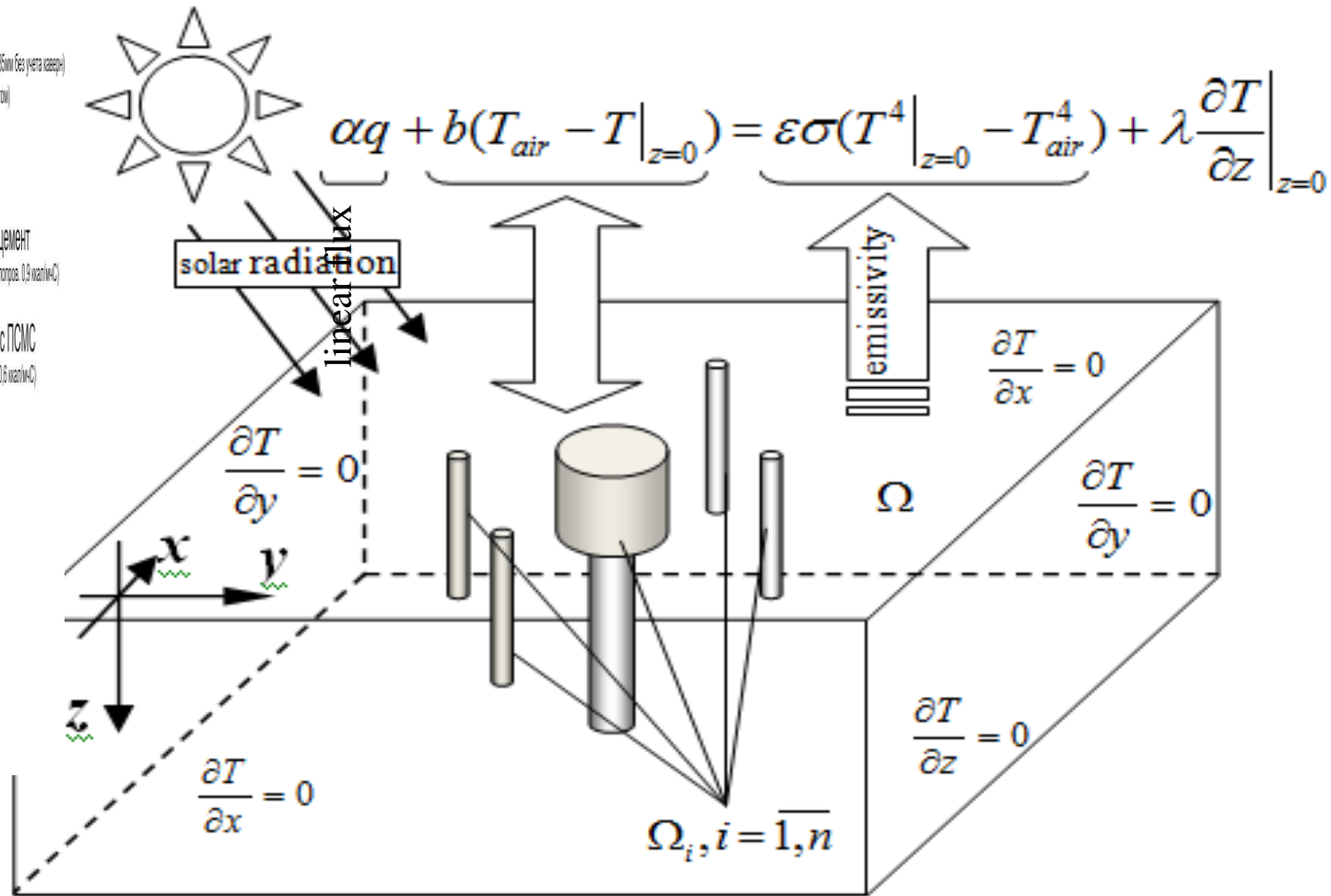
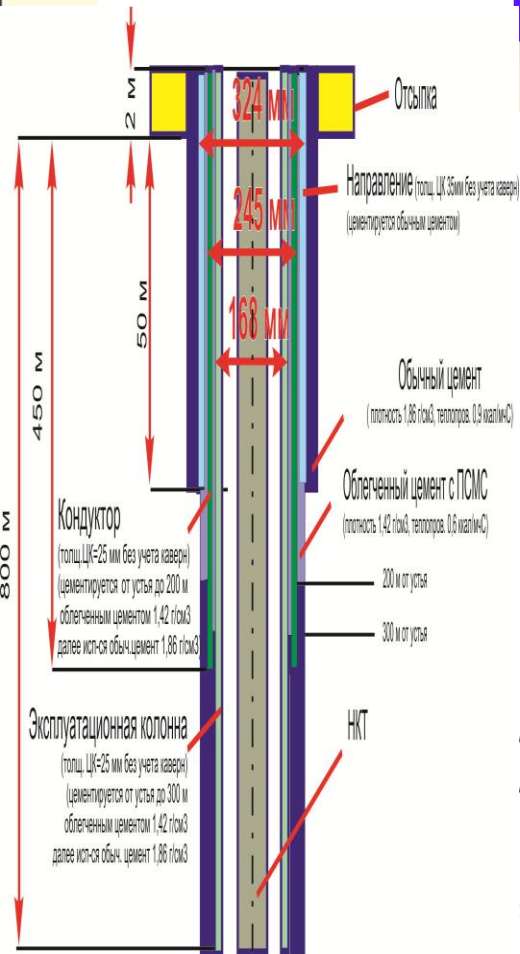
## 2. Физическая постановка задач теплопереноса для

### кустовых площадок в ММП

При моделировании нестационарных процессов переноса тепла(холода) от различных инженерных систем в ММП нужно учитывать следующие факторы:

- *различные теплофизические параметры неоднородного грунта (не только в вертикальной плоскости), меняющиеся со временем;*
- *сезонные колебания температур воздуха и солнечного излучения;*
- *возможный фазовый переход в грунте;*
- *инженерные сооружения, которыми оснащены различные добывающие и нагнетательные скважины, состав, толщина и время начала отсыпки рабочей площадки, наличие СОУ, ГФУ, ВФУ;*
- *начальная стадия проведения бурильных работ (до двух недель), когда происходит прохождении верхнего слоя мерзлого грунта бурильным инструментом, влияющим на растепление **ММП**.*

# Краевые условия на границах расчётной области



## Обозначения

Через  $T_{air}(t)$  обозначена температура воздуха в приповерхностном слое, которая изменяется периодически в соответствии с годовым температурным циклом,

$\sigma=5,67 \cdot 10^{-8} \text{ Вт}/(\text{м}^2 \text{ К}^4)$  – постоянная Стефана-Больцмана,

$b=b(t,x,y)$  – коэффициент теплообмена,

$\varepsilon=\varepsilon(t,x,y)$  – коэффициент серости.

Коэффициенты теплообмена и серости зависят от типа и состояния поверхности грунта.

Суммарная солнечная радиация  $q(t)$  состоит из суммы прямой солнечной радиации и рассеянной радиации. Грунтом поглощается только часть суммарной радиации равной  $\alpha q(t)$ , где

$\alpha=\alpha(t,x,y)$  – доля энергии, ушедшая на нагрев грунта, которая в общем случае зависит от состояния атмосферы, угла падения солнечных лучей, т.е. широты местности и времени суток.

## ЦЕЛЬ ИССЛЕДОВАНИЙ –

**моделирование сложных технических систем и расчет нормативных данных для оптимального проектирования кустовых площадок и уменьшения теплового влияния инженерных систем на ММП**

Проблема уменьшения интенсивности теплового взаимодействия в системе

**«источник тепла – ММП»**

имеет особое значение для решения задач энергосбережения, охраны окружающей среды, безопасности, экономии затрат и повышению эксплуатационной надежности скважин.

# Математическая модель

- ▣ Пусть в начальный момент времени  $t_0=0$  грунт занимает заданный параллелепипед  $\Omega$  и имеет температуру  $T_0(x,y,z)$ . Расчетная область представляет собой трехмерный параллелепипед, в котором оси  $x$  и  $y$  расположены параллельно поверхности грунта, а ось  $z$  направлена вниз. Будем считать, что размер области  $\Omega$  определяется положительными числами  $L_x, L_y, L_z$ . Для моделирования распространения тепла в этом объеме была предложена следующая математическая модель.
- ▣ Пусть  $T=T(t,x,y,z)$  – температура грунта в точке  $(x,y,z)$  в момент времени  $t$ .

Область  $\Omega$  может включать в себя различные инженерные сооружения (например, искусственные слои отсыпки на поверхности грунта, сваи и др.).

Предположим, что в области  $\Omega$  могут находиться  $n$  объектов, являющихся **источниками тепла** (фундаменты, добывающие теплоизолированные скважины, трубопроводы, факельные установки) и **источниками холода** (например, СОУ).

Обозначим поверхности этих объектов через  $\Omega_i=\Omega_i(x,y,z), i=1,\dots,n$ .

# Основное уравнение

*В качестве основной математической модели для учета распространения тепла (холода) от каждого  $i$ -го объекта используется уравнение контактной (диффузионной) теплопроводности с неоднородными коэффициентами, включающее локализованную теплоемкость фазового перехода – подход, позволяющий решать задачу типа Стефана, без явного выделения границы фазового перехода (Самарский А.А. и др. 1965г.). При этом теплота фазового превращения вводится с применением  $\delta$ -функции Дирака как сосредоточенная теплоемкость фазового перехода в коэффициент теплоемкости. Получаемая таким образом разрывная функция затем «распределяется» по температуре, и не зависит от числа измерений и фаз. Таким образом, моделирование процессов растепления в грунте сводится к решению в области  $\Omega$  уравнения*

$$\rho(c_v(T) + k\delta(T - T^*)) \frac{\partial T}{\partial t} = \operatorname{div}(\lambda(T) \operatorname{grad} T) \quad (1)$$

$$T(0, x, y, z) = T_0(x, y, z), \quad (2)$$

где  $\rho = \rho(x, y, z)$  – плотность [кг/м<sup>3</sup>],

$T^* = T^*(x, y, z)$  – температура фазового перехода,

$$c_v(T) = \begin{cases} c_1(x, y, z), & \text{при } T < T^*, \\ c_2(x, y, z), & \text{при } T > T^*, \end{cases} \quad \begin{array}{l} \text{– удельная теплоемкость} \\ \text{[Дж/кг К],} \end{array}$$

$$\lambda(T) = \begin{cases} \lambda_1(x, y, z), & \text{при } T < T^*, \\ \lambda_2(x, y, z), & \text{при } T > T^*, \end{cases} \quad \begin{array}{l} \text{– коэффициент} \\ \text{теплопроводности [Вт/м} \\ \text{К],} \end{array}$$

$k = k(x, y, z)$  – теплота фазового перехода,

$\delta$  – дельта-  
функция Дирака.

# Граничные условия

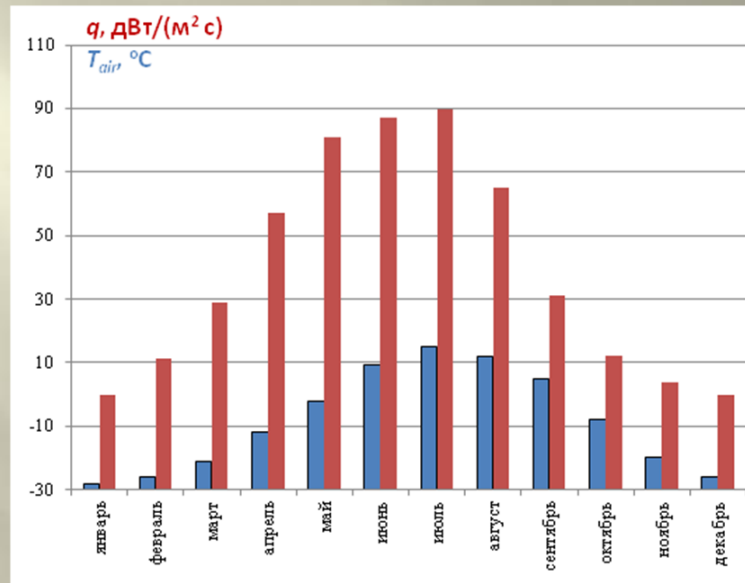
$$\alpha q + b(T_{air} - T|_{z=0}) = \varepsilon \sigma(T^4 - T_{air}^4) + \lambda \frac{\partial T}{\partial z} \Big|_{z=0} \quad (3)$$

$$T|_{\Omega_i} = T_i(t), i = 1, \dots, n$$

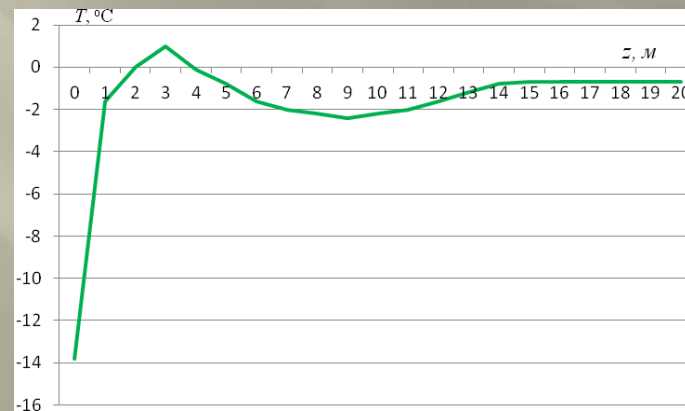
$$\frac{\partial T}{\partial x} \Big|_{x=\pm L_x} = 0 \quad \frac{\partial T}{\partial y} \Big|_{y=\pm L_y} = 0 \quad \frac{\partial T}{\partial z} \Big|_{z=-L_z} = 0$$



# Исходные климатические данные



*Интенсивность солнечной радиации (красный)  $q$  и средняя температура воздуха (синий) по месяцам  $T_{air}$  для заданного географического места.*



**Распределение температуры в грунте в зависимости от глубины**

Для численного решения многомерных прикладных задач типа **Стефана**, применяются методы, основанные на подходе А.Н. Тихонова и А.А. Самарского.

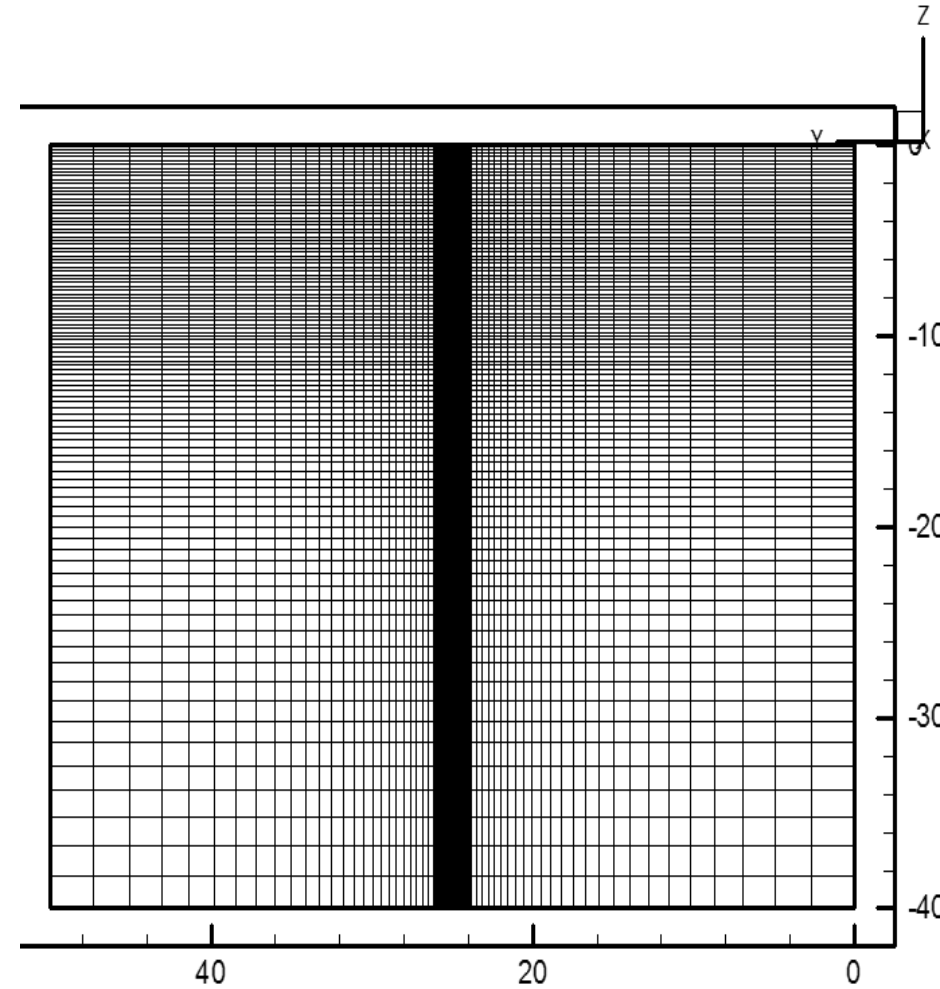
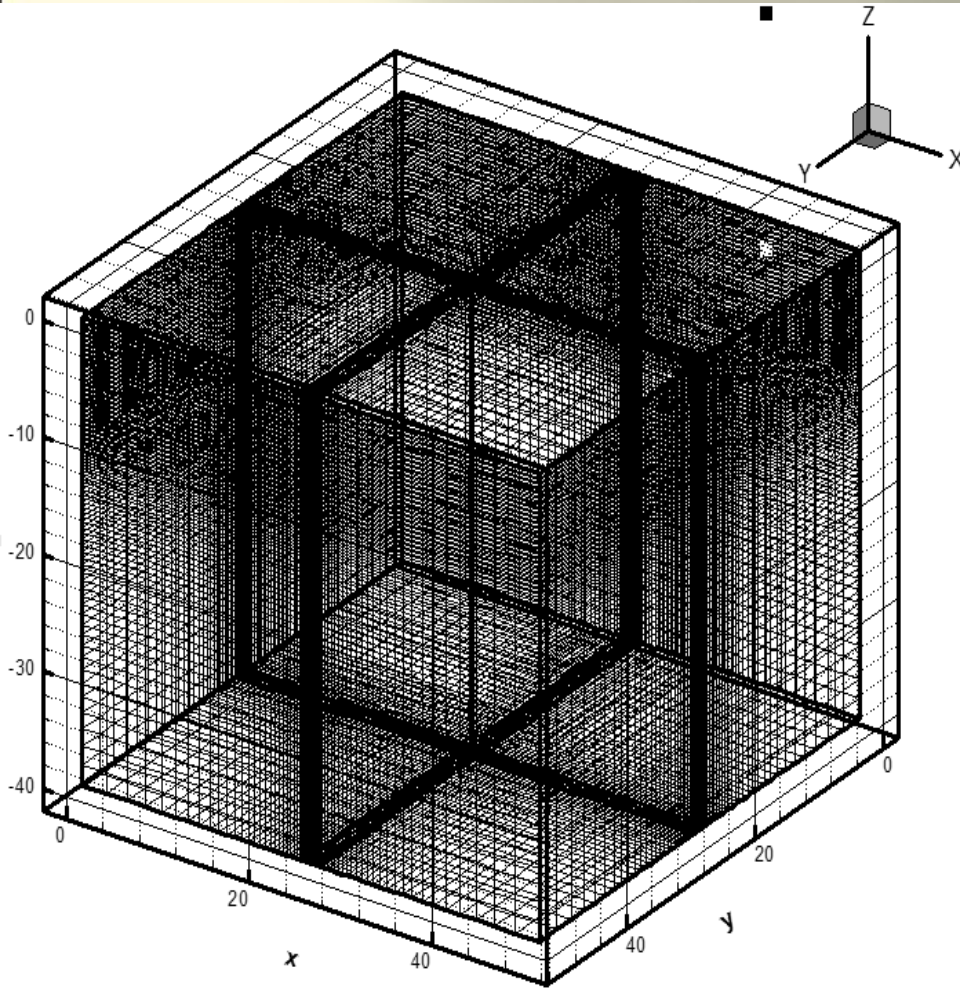
С использованием этого подхода, в работе

**Самарский А.А., Моисеенко Б.Д. Экономическая схема сквозного счета для многомерной задачи Стефана // ЖВМиМФ, 1965. Т. 5, № 5. С. 816-827.**

реализована экономичная схема сквозного счета со сглаживанием разрывных коэффициентов в уравнении теплопроводности по температуре в окрестности фазового превращения. Схема сквозного счета характеризуется тем, что граница раздела фаз явно не выделяется, и используются однородные разностные схемы. При этом теплота фазового превращения вводится с применением  **$\delta$ -функции Дирака** как сосредоточенная теплоемкость фазового перехода в коэффициент теплоемкости.

Общий вид расчетной сетки.

Расчетная сетка –  
плоскость (y,z)



# Особенности методики расчета.

1. Используется метод расчета без явного выделения границы фазового перехода. [Самарский А.А., Вабищевич П.Н. Вычислительная теплопередача. М: Едиториал, 2003]
2. Для расчета температурного поля в трехмерной области используется метод расщепления по пространственным переменным с неявной экономичной трехточечной схемой.
3. Расчет проводится на ортогональной сетке, однородной либо сгущающейся в областях источников тепла (холода).
4. Система линейных разностных уравнений имеет трехдиагональный вид и решается методом прогонки.
5. Нелинейное граничное условие на дневной поверхности включается в систему разностных уравнений и решается методом Ньютона.

## Численная схема

Решение задачи (1)-(3) на каждом временном шаге сводится к решению системы одномерных разностных уравнений, начальные данные для которых берутся с предыдущего шага (экономичная локально-одномерная схема). См.

**Самарский А.А., Вабищевич П.Н. Вычислительная теплопередача. М.: Едиториал УРСС, 2003. 784 с.**

Пусть  $\{x_i, i=0, \dots, N-1\}$  – точки расчетной сетки, в общем случае неравномерной. Рассмотрим

$$\delta_i = \min \left\{ \frac{x_i - x_{i-1}}{2}, \frac{x_{i+1} - x_i}{2} \right\}$$

Выпишем составляющие дивергенции и градиента по  $x$

$$\lambda_{i-0.5} \text{div}_{i-0.5}^x = \lambda_{i-0.5} \frac{\partial T}{\partial x}(x_{i-0.5}) = \lambda_{i-0.5} \frac{T_i - T_{i-1}}{x_i - x_{i-1}}$$

$$\lambda_{i+0.5} \text{div}_{i+0.5}^x = \lambda_{i+0.5} \frac{\partial T}{\partial x}(x_{i+0.5}) = \lambda_{i+0.5} \frac{T_{i+1} - T_i}{x_{i+1} - x_i}$$

$$\begin{array}{rccccccc}
b_0 T_0 & + & c_0 T_1 & & & & = & d_0, \\
a_1 T_0 & + & b_1 T_1 & + & c_1 T_2 & & = & d_1, \\
& \dots & & & & & & \dots \\
& & a_{N-2} T_{N-3} & + & b_{N-2} T_{N-2} & + & c_{N-2} T_{N-1} & = & d_{N-2}, \\
& & & & a_{N-1} T_{N-2} & + & b_{N-1} T_{N-1} & = & d_{N-1},
\end{array}$$

$$a_i = -\frac{\lambda_{i-0.5}}{2\delta_i(x_i - x_{i-1})}$$

$$c_i = -\frac{\lambda_{i+0.5}}{2\delta_i(x_{i+1} - x_i)}$$

$$b_i = \frac{1}{D_t} \rho [C_v(T) + \kappa \delta (T - T_f)] \Big|_{x=x_i} + \frac{1}{2\delta_i} \left[ \frac{\lambda_{i+0.5}}{x_{i+1} - x_i} + \frac{\lambda_{i-0.5}}{x_i - x_{i-1}} \right]$$

$$d_i = \frac{T_i'}{D_t} \rho [C_v(T) + \kappa \delta (T - T_f)] \Big|_{x=x_i}$$

# Разрешимость разностной системы установлена в работах

1. Ваганова Н.А. Существование решения разностной начально-краевой задачи для линейного уравнения теплопроводности с нелинейным краевым условием // Труды института математики и механики. 2008. Т. 14, №1. С. 11-21.
2. Башуров Вл.В., Ваганова Н.А., Филимонов М.Ю. Численное моделирование процессов теплообмена в грунте с учетом фильтрации жидкости // Вычислительные технологии, 2011. Т. 16. № 4. С. 3-19.

# 3. Сравнение с экспериментальными данными на месторождении «Русское»

## Выполнение работ по проведению мониторинга многолетнемерзлых пород на нефтяном месторождении Русское

Отчёт о выполнении Этапа 5. Камеральная обработка результатов мониторинга ММП в условиях сезонного растепления, прогноз растепления ММП при эксплуатации скважин кустовых площадок №№ 1,3 Русского месторождения на 2012-2013 гг., выработка рекомендаций по мероприятиям, предупреждающим возможные отклонения при эксплуатации.

RUS-SS-R226-500-SU-REP-0011-R-D01

**НОРДЭКО**  
Е В Р А З И Я



## ВЫПОЛНЕНИЕ РАБОТ ПО ПРОВЕДЕНИЮ МОНИТОРИНГА МНОГОЛЕТНЕМЕРЗЛЫХ ПОРОД НА НЕФТЯНОМ МЕСТОРОЖДЕНИИ РУССКОЕ

Отчёт о выполнении Этапа 5. Камеральная обработка результатов мониторинга ММП в условиях сезонного растепления, прогноз растепления ММП при эксплуатации скважин кустовых площадок №№ 1,3 Русского месторождения на 2012-2013 гг., выработка рекомендаций по мероприятиям, предупреждающим возможные отклонения при эксплуатации.



# Нахождение границы растепления ММП от нагнетательной скважины

Выполнение работ по проведению мониторинга многолетнемерзлых пород на нефтяном месторождении Русское

Отчёт о выполнении Этапа 5.

RUS-SS-R226-500-SU-REP-0011-R-D01

Как показывают расчеты, перерывы в закачке продолжительностью до 6 месяцев можно не учитывать, поскольку скважина не успевает остывать за этот срок. Практически скважина 2Г эксплуатировалась в течении 2-х лет, что соответствует

**расчетному радиусу растепления ММП на глубине отсутствия сезонных колебаний 4.65 м (рис. 25).**

Данные радиоволнового просвечивания положения фронта распространения талых пород зафиксировано

**на расстоянии 4.4 м от скважины 2Г.**

Отсюда видно, что даже при наличии аномального талика реальный процесс растепления идет с незначительно меньшей скоростью, чем предусмотрено математической моделью, и соответствует Техническому регламенту по размещению устьев скважин на кустовых площадках Русского месторождения.

# Итоги мониторинга на месторождении «Русское»

Выполнение работ по проведению мониторинга многолетнемерзлых пород на нефтяном месторождении Русское

Отчёт о выполнении Этапа 5.

RUS-SS-R226-500-SU-REP-0011-R-D01

## ЗАКЛЮЧЕНИЕ

В ходе работ, проведенных в рамках этапа 5 произведена камеральная обработка результатов полевых работ этапа 4, проведено сопоставление параметров растепления ММП как с ранее измеренными, так и с рассчитанными по математической модели растепления ММП.

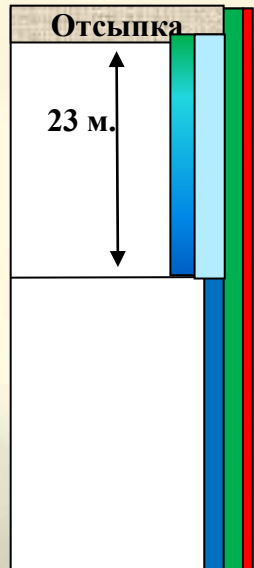
На основе результатов работ по этапу 4 и по договору в целом можно сделать следующие выводы:

1. Процессы растепления в зоне развития аномального талика кустовой площадке № 1 месторождения Русское, образовавшегося в результате воздействия дополнительных техногенных факторов в 2010-2011 гг., нормализовались и соответствуют параметрам, установленным «Техническим регламентом по размещению устьев скважин на кустовых площадках Русского месторождения»;
2. Параметры растепления ММП на кустовой площадке №3 соответствуют характеристикам, полученным в результате математического моделирования и установленным Техническим регламентом по размещению устьев скважин на кустовых площадках Русского месторождения;

# Численные результаты

## Оболочки на скважине

Температура на радиусе  $R_0=0.084$  м., **+80С**



до 23 м.:

$R_1=0.260$  м. - **обычный цемент**

$R_2=0.410$  м. - **пенopleкс**

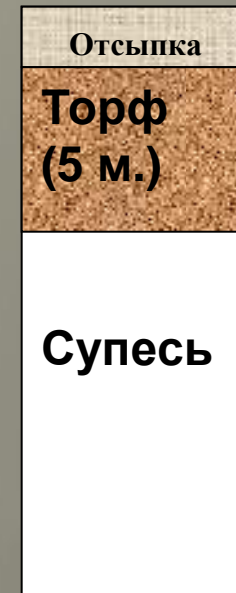
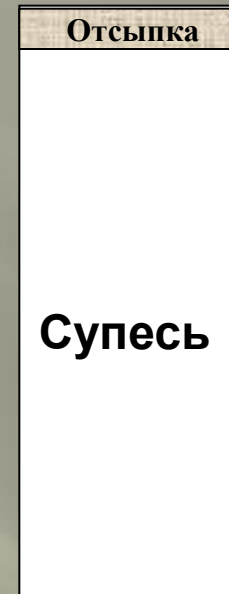
$R_3=0.510$  м. - **обычный или  
тампонажный цемент**

до 40 м.:

$R_4=0.1225$  м. – **обычный цемент**

$R_5=0.2225$  м. – **тампонажный цемент**

## Слой грунта



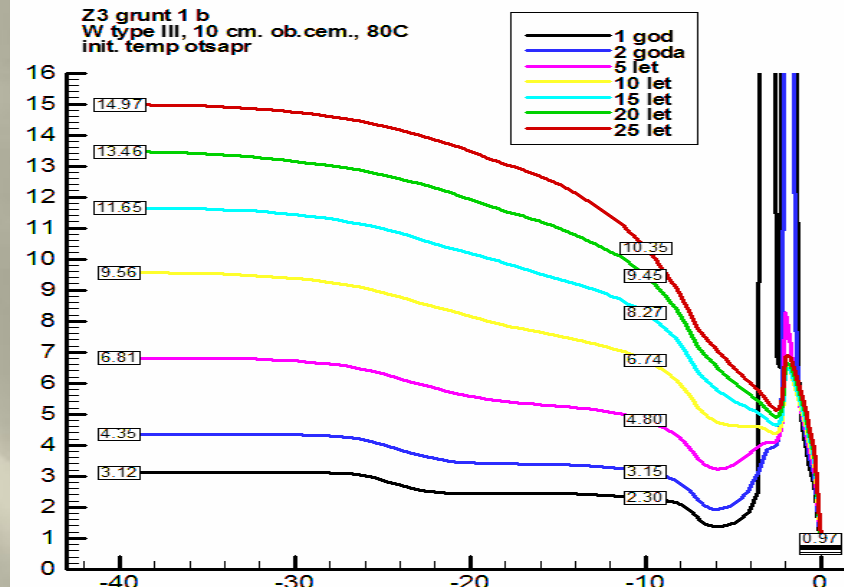
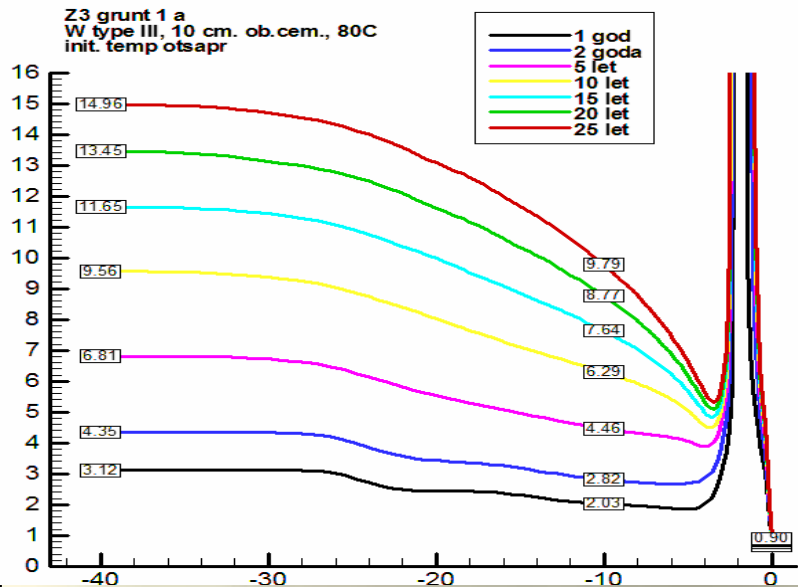
	Плотность, кг/м <sup>3</sup>	Теплопроводность, Вт/(м К)	Теплоемкость, кДж/(кг К)
<b>Обычный цемент</b>	<b>2500.0</b>	<b>1.69</b>	<b>0.84</b>
<b>Тампонажный цемент</b>	<b>960.0</b>	<b>0.21</b>	<b>0.84</b>
<b>Пенopleкс</b>	<b>80.0</b>	<b>0.031</b>	<b>1.53</b>

# Радиусы растепления

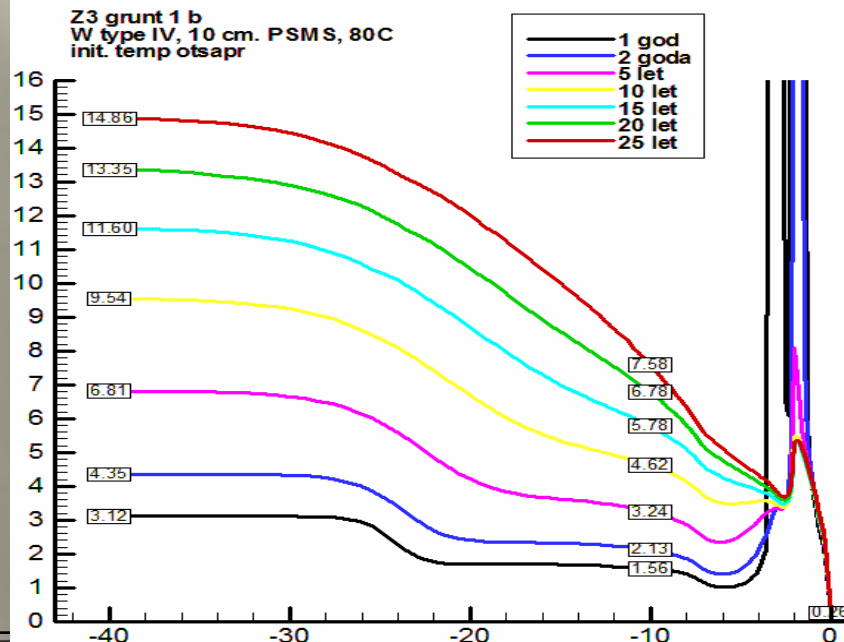
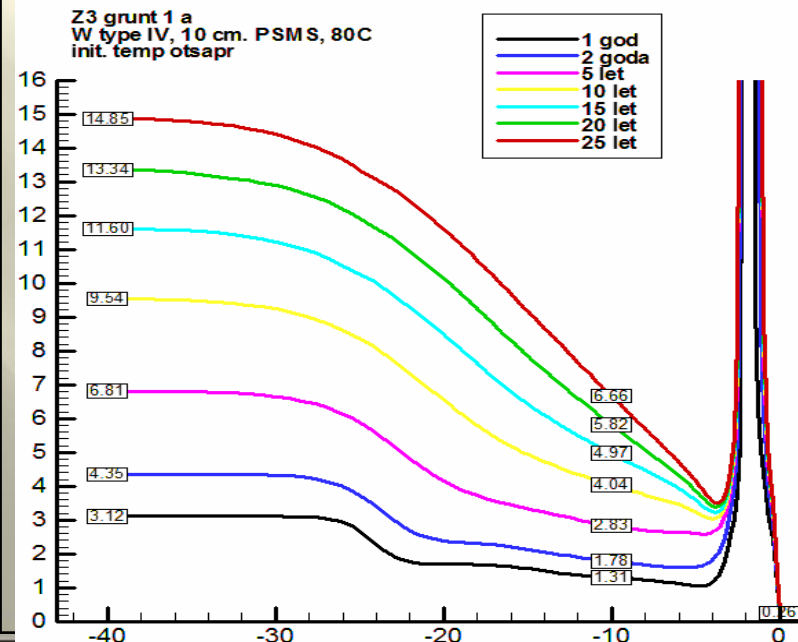
супесь

торф(5 м.) + супесь

обычный цемент



тампажный цемент



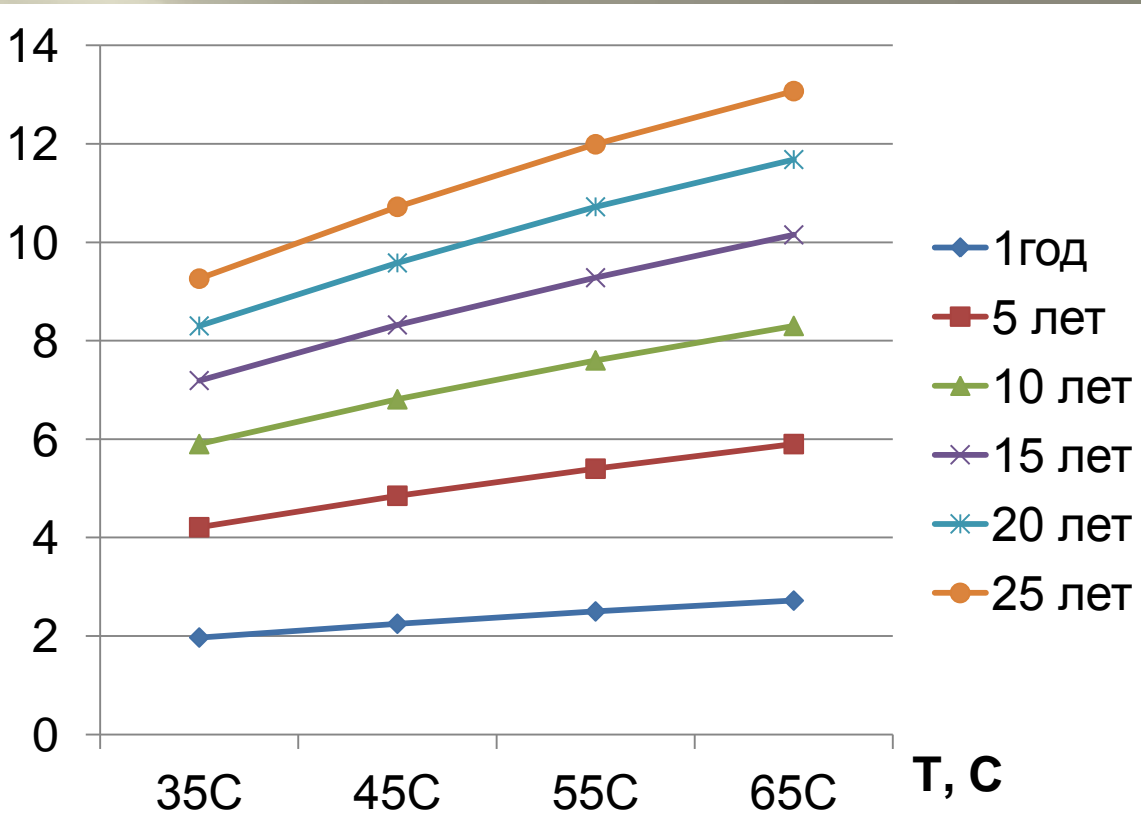
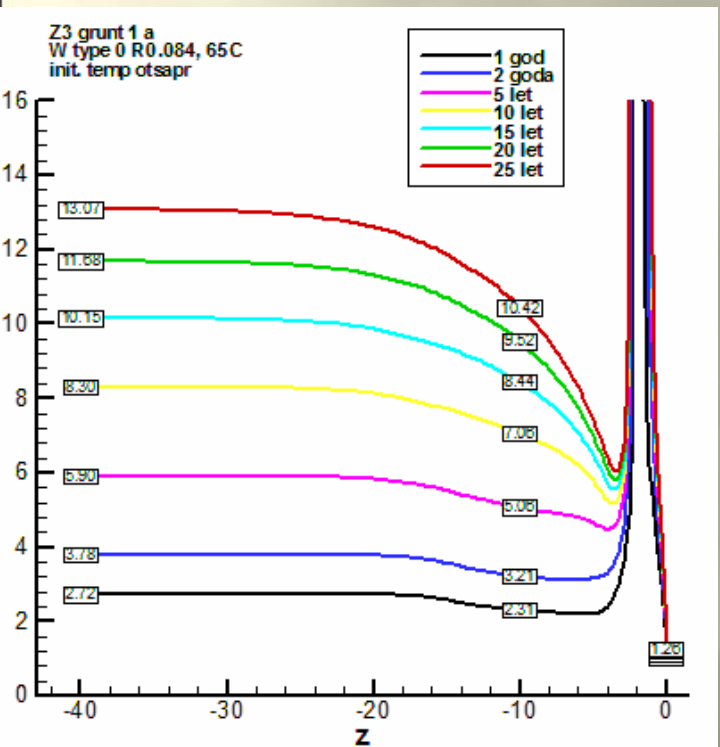
# Изменение радиуса растепления в зависимости от температуры скважины.

Отсыпка

Супесь

$R_0=0.084$  м.  
 $R_1=0.162$  м.  
 $R_2=0.387$  м.

R на глубине 40 м.

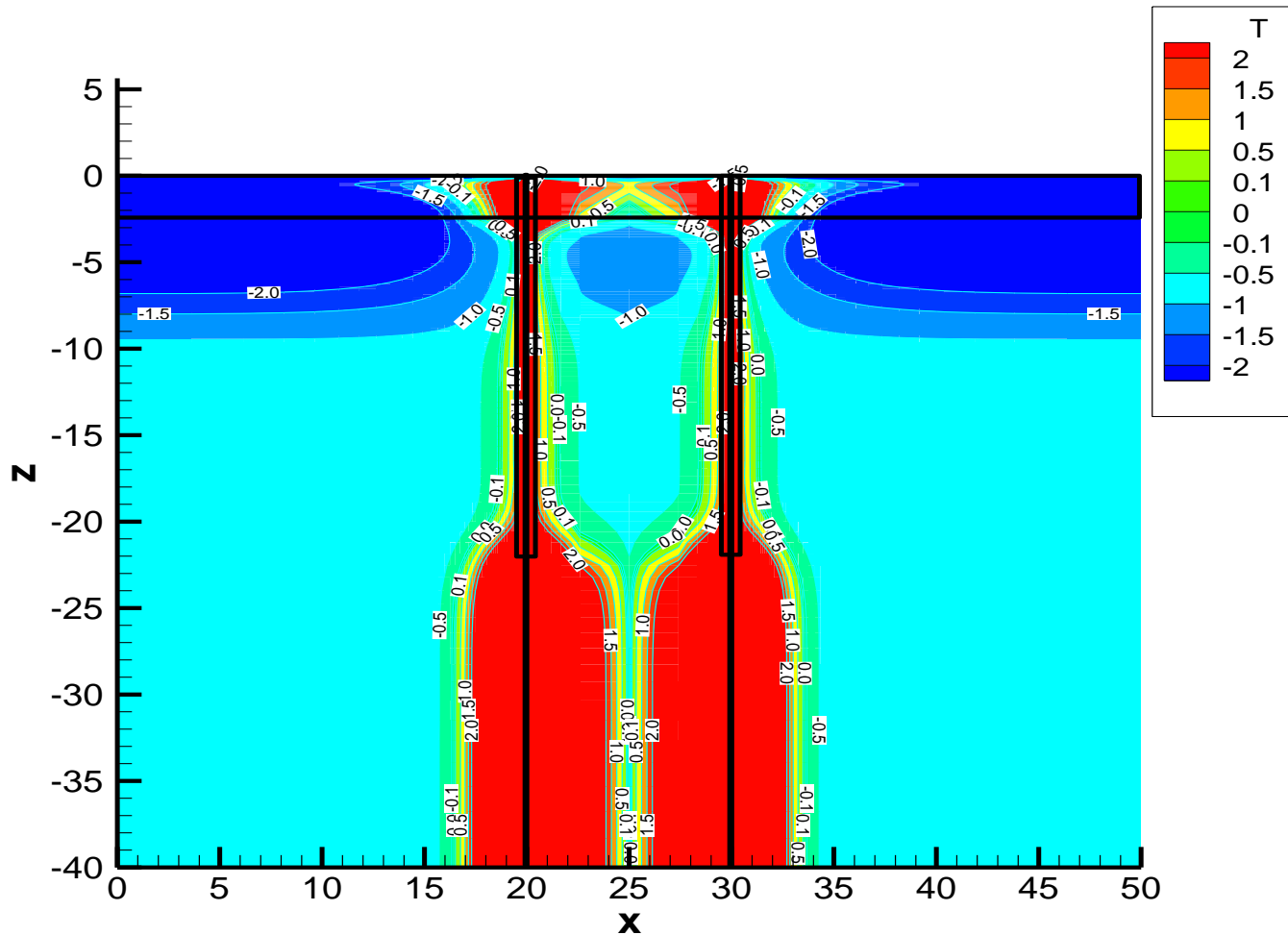


2 скважины, R=89 мм. **Время счета – 24 часа**

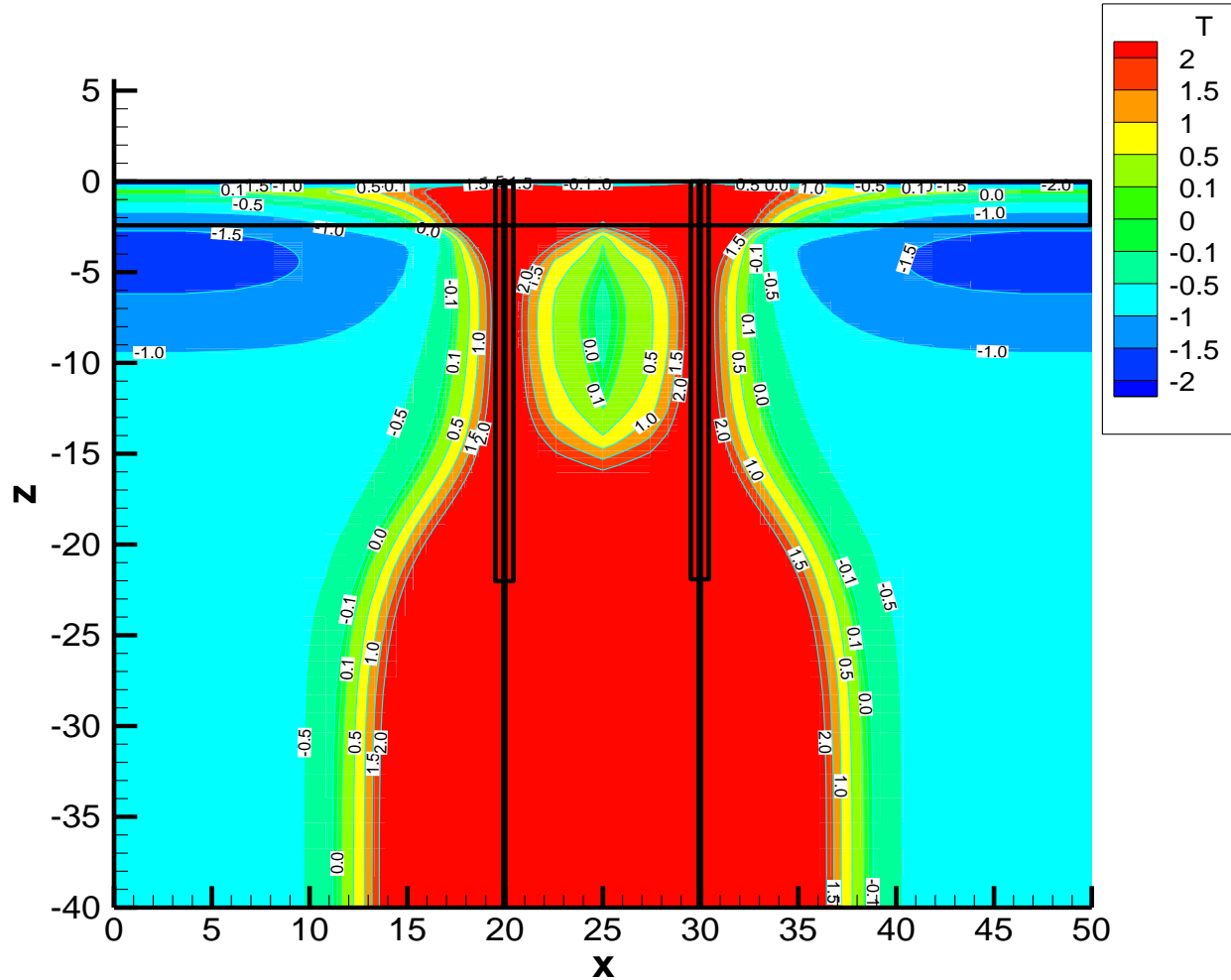
**на суперЭВМ**

**T<sub>0</sub> = -0.7С, T<sub>скважины</sub> = 45С,**

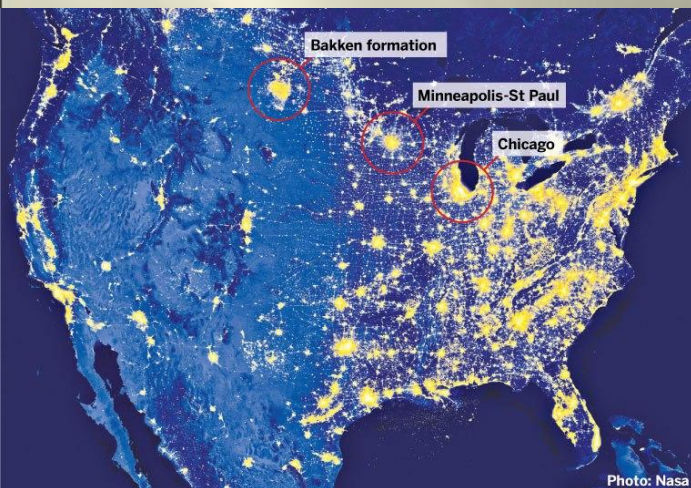
**Термокейс до глубины 22м. (Ванкорское месторождение, 1.5 года октябрь)**



2 скважины, R=89 мм. T<sub>0</sub>=-0.7С  
Т<sub>скважины</sub>=45С,  
Термокейс до глубины 22м. (Ванкорское  
месторождение, 9.5 лет, октябрь)



# ВИД ЗЕМЛИ НОЧЬЮ ИЗ КОСМОСА

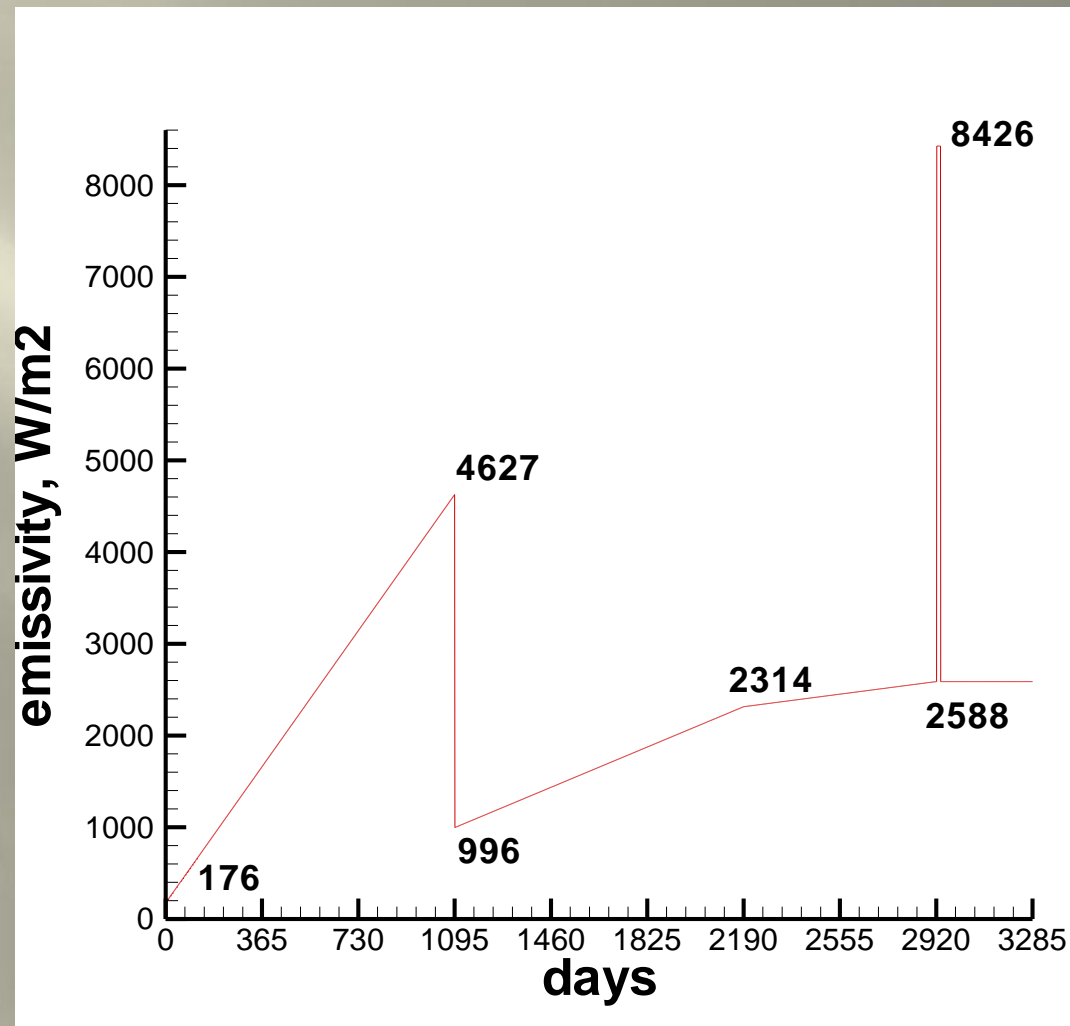


Ночной космический снимок Европы и России.  
**Красные пятна - горящий нефтяной газ.**  
**Жёлтые пятна - электрической освещение.**

*Сжигание сланцевого газа в США*



# РАСТЕПЛЕНИЕ ММП от ВФУ на Куюмбинском месторождении 2015 г. ( пакет Flameground-M)



Сценарий работы факельной установки в течение 8 лет.

# Зона ответственности ОАО «Гипровостокнефть»

Номер на плане	Наименование
	<b>I ЭТАП СТРОИТЕЛЬСТВА</b>
<u>Технологические сооружения</u>	
1	Площадка входной гребенки (манифольд)
2	Установка подготовки нефти. Линия 1
2.1	Технологическая площадка N1
2.2	Блок нагрева нефти
2.2.1	Площадка нагрева нефти
2.2.2	Площадка запорной арматуры с дренажной емкостью
2.3	Технологическая площадка N2
2.4	Площадка дренажных емкостей
3	Резервуарный парк
3.1-3.4	РВС-10000, V=10000 м3
3.5	Площадка узла переключения нефти
3.6	Площадка дренажных емкостей
4	Площадка реагентного хозяйства
5	Склад реагентов
5.1	Здание склада
5.2	Крытая стоянка для автопогрузчика
6	Блок распределения газа
6.1	Площадка блока распределения газа
6.2	Площадка дренажной емкости блока распределения газа
7	Насосная внутрипарковой перекачки и внешнего транспорта
7.1	Насосная
7.2	Площадка дренажной емкости
9	Факельное хозяйство

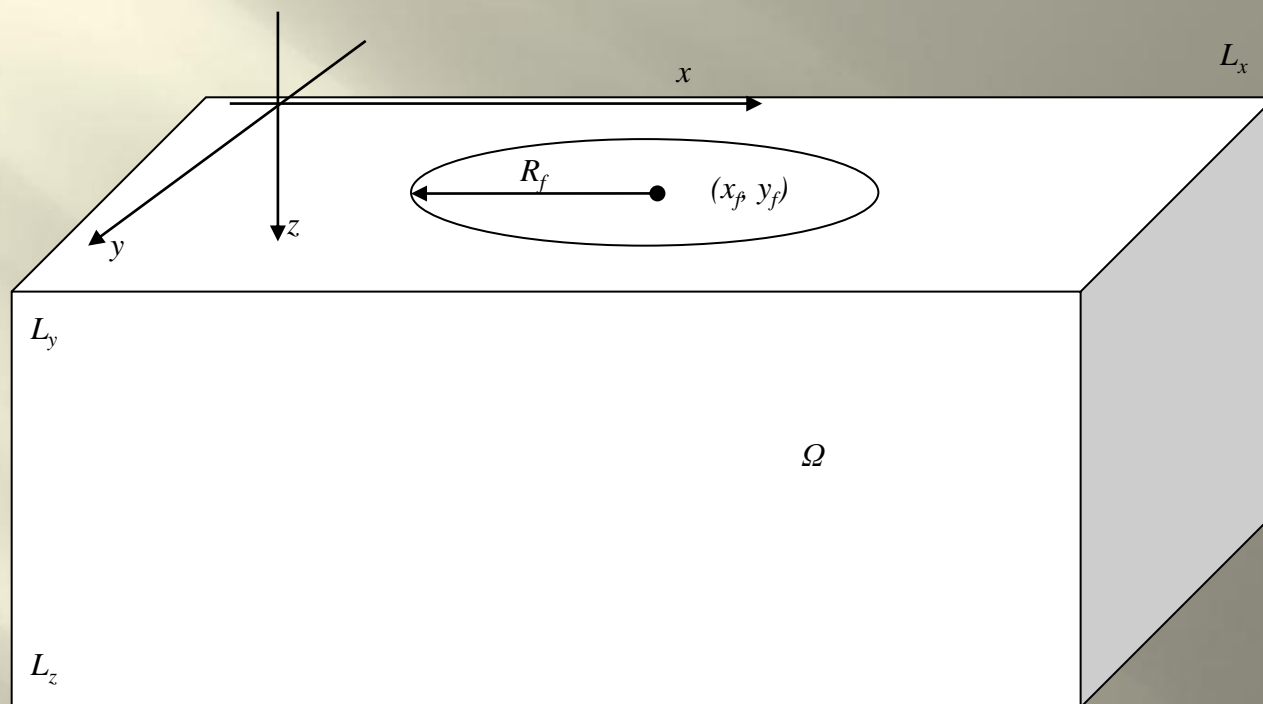
$$\rho(c_v(T) + k\delta(T - T^*)) \frac{\partial T}{\partial t} = \text{div}(\lambda(T) \text{grad } T) \quad (1)$$

$$T(0, x, y, z) = T_0(x, y, z), \quad (2)$$

$$f(x, y) + \alpha q + b(T_{air} - T|_{z=0}) = \varepsilon\sigma(T^4 - T_{air}^4) + \lambda \frac{\partial T}{\partial z} \Big|_{z=0} \quad (3)$$

$$\frac{\partial T}{\partial x} \Big|_{x=\pm L_x} = 0 \quad \frac{\partial T}{\partial y} \Big|_{y=\pm L_y} = 0 \quad \frac{\partial T}{\partial z} \Big|_{z=-L_z} = 0$$

# Схема расчетной области



Для определения термального следа на поверхности грунта от вертикальной факельной системы будем использовать

$$f(x, y) = \begin{cases} 0, & \text{при } (x - x_f)^2 + (y - y_f)^2 > R_f \\ \left( 1 - \frac{\sqrt{(x - x_f)^2 + (y - y_f)^2}}{R_f} \right)^2 P_f, & \text{при } (x - x_f)^2 + (y - y_f)^2 \leq R_f \end{cases} \quad (4)$$

$(x_f, y_f)$

- координаты центра факельной системы,  
 $R_f$  - радиус,

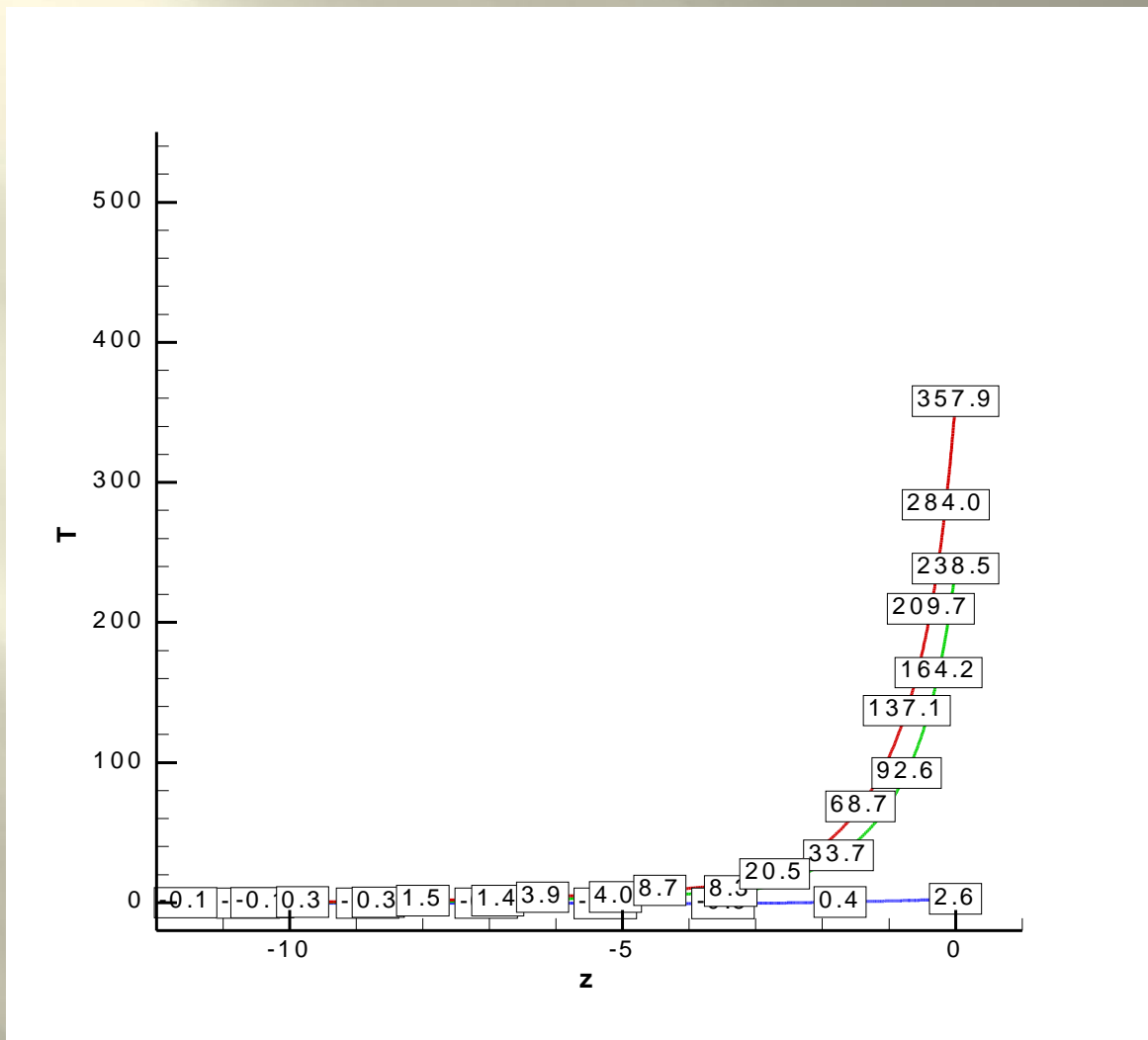
$P_f$

- плотность теплового потока в центре  
на поверхности земля-воздух.

# Структура грунта и слоев отсыпки (ММП - 0.3Сдо 50 м. Куюмбинское месторождение)

щебенистый грунт доломита, 3 м.			ОТСЫПКА до 3,1м.															
Пеностекло, гравий, 0.1 м.																		
<table border="1" style="margin-left: auto; margin-right: auto;"> <thead> <tr> <th>№</th> <th>Глубина слоя</th> <th>грунт</th> </tr> </thead> <tbody> <tr> <td style="text-align: center;">1</td> <td style="text-align: center;">0-1,8 м</td> <td style="text-align: center;">ИГЭ-м23</td> </tr> <tr> <td style="text-align: center;">2</td> <td style="text-align: center;">1,8-3,5 м.</td> <td style="text-align: center;">ИГЭ-м83</td> </tr> <tr> <td style="text-align: center;">3</td> <td style="text-align: center;">3,5 -9,2 м.</td> <td style="text-align: center;">ИГЭ-м77</td> </tr> <tr> <td style="text-align: center;">4</td> <td style="text-align: center;">9,2 – 50 м.</td> <td style="text-align: center;">ИГЭ-м77</td> </tr> </tbody> </table>			№	Глубина слоя	грунт	1	0-1,8 м	ИГЭ-м23	2	1,8-3,5 м.	ИГЭ-м83	3	3,5 -9,2 м.	ИГЭ-м77	4	9,2 – 50 м.	ИГЭ-м77	ГРУНТ (ММП до 50 м)
№	Глубина слоя	грунт																
1	0-1,8 м	ИГЭ-м23																
2	1,8-3,5 м.	ИГЭ-м83																
3	3,5 -9,2 м.	ИГЭ-м77																
4	9,2 – 50 м.	ИГЭ-м77																

# 2,5 года работы факельной системы (сентябрь 2020), – профиль температуры вблизи поверхности.



# Сравнение теплоизоляционных свойств различных материалов из пеностекла

	плита, 10 см				гравий, 10 см.			
	D100		D250		D250		D600	
	горизонт таяния, м.	<i>Т°С на глуб. 4 м.</i>	горизонт таяния, м.	<i>Т°С на глуб. 4 м.</i>	горизонт таяния, м.	<i>Т°С на глуб. 4 м.</i>	горизонт таяния, м.	<i>Т°С на глуб. 4 м.</i>
1 год	6.35	2.28	6.60	2.65	6.30	2.18	6.40	3.48
2 года	10.10	8.61	10.30	9.09	10.00	8.38	10.63	10.21
3 года	12.50	13.74	12.64	14.21	12.50	13.50	12.94	15.25
4 года	14.26	10.21	14.44	10.17	14.26	10.23	15.00	9.94
5 лет	15.00	10.11	15.20	10.14	15.00	10.11	15.40	10.23
6 лет	15.60	11.26	15.81	11.37	15.60	11.21	15.81	11.64
7 лет	16.25	12.35	16.25	12.46	16.25	12.29	16.47	12.73
8 лет	16.94	13.07	16.94	13.17	16.71	13.02	16.94	13.40



**В основе пакета Flameground-M лежит пакет Wellfrost, хорошо зарекомендовавший себя на 11-ти северных нефтегазовых месторождениях:**

**2010 г: Сузунского и Тагульского.**

**2011г: Ново-Уренгойского и Восточно-Уренгойского.**

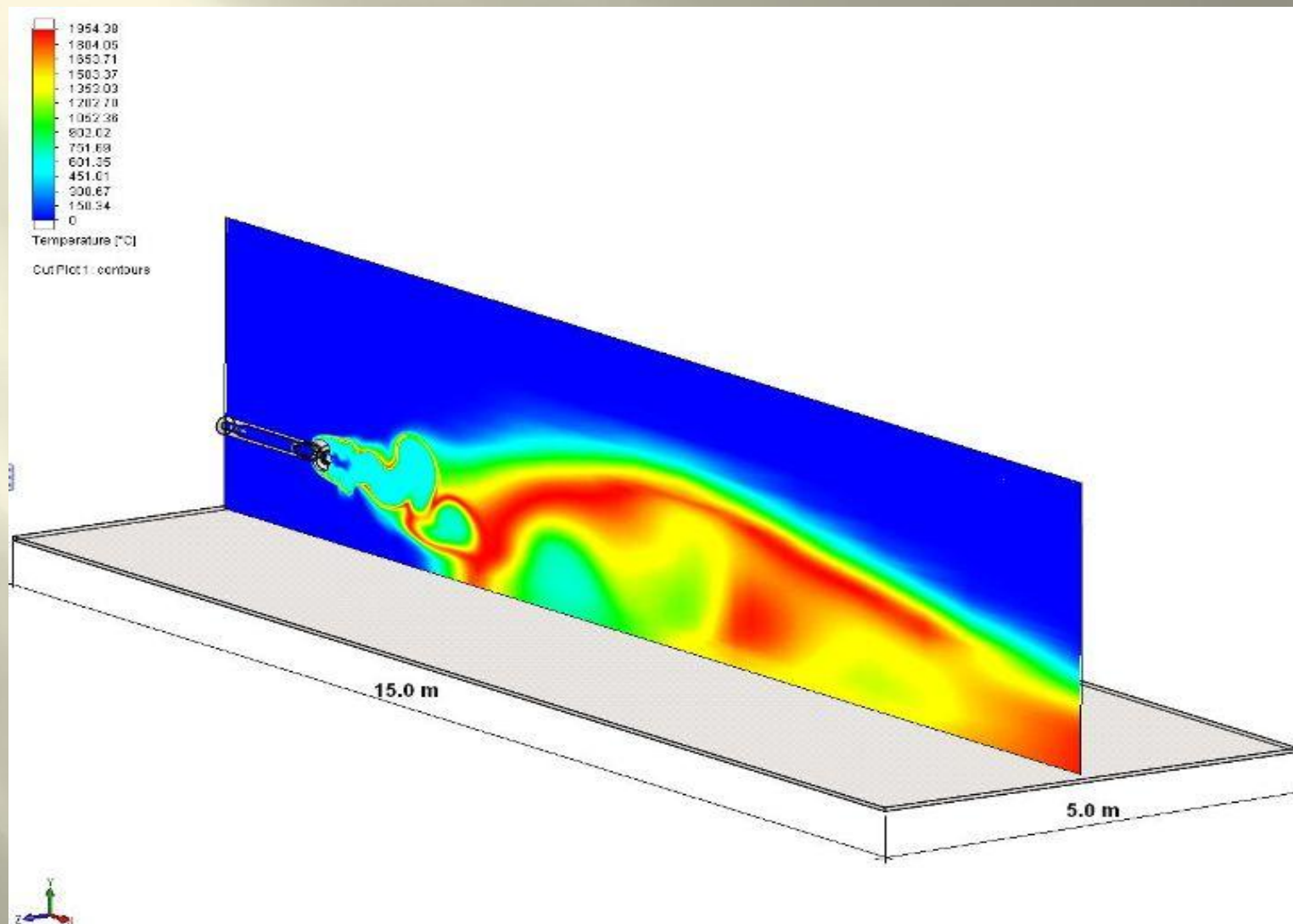
**2012г: Западно-Мессояхского и Восточно-Мессояхского и Восточно-Уренгойского.**

**2013г: Западно-Мессояхского и Восточно-Мессояхского.**

**2014г: Ванкорское.**

**2015г: Куюмбинское.**

# Моделирование и расчет горизонтальных факельных установок (ГФУ) для Месояхских месторождений (пакета Flameground)



# Объект Горизонтальное факельное устройство Вариант А)



источник тепла 800 оС

4 м

0,2 м

клинкерный кирпич 0,05 м

щебень 0,2 м

песок 0,1 м

пенобетон 0,6 м

пеноплекс 0,3 м

песок 3 м

ММП



# Вариант В)

источник тепла 800 оС

4 м

0,2 м

клинкерный кирпич 0,05 м

щебень 0,2 м

песок 0,1 м

пенобетон 0,6 м

пеноплекс 0,6 м

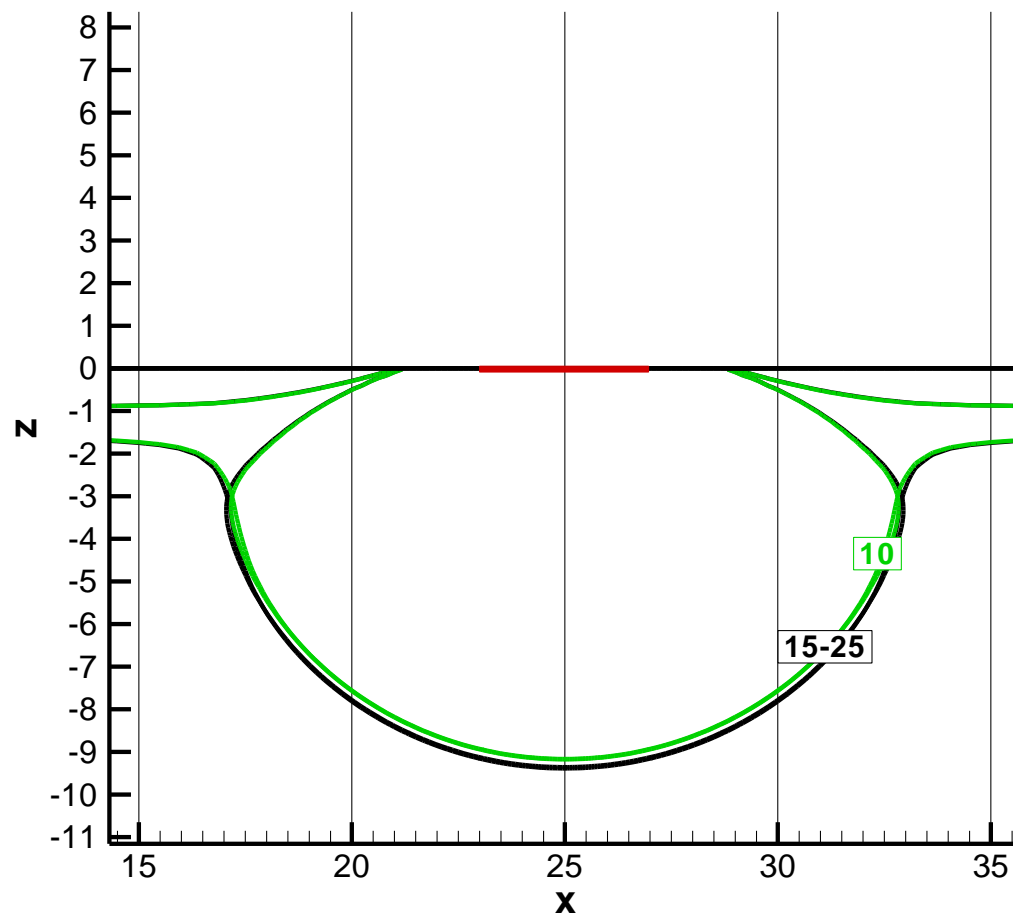
песок 3 м

ММП



Размеры факельного амбара 25\*35 м.

# РАСТЕПЛЕНИЕ ММП ОТ ГФУ



Обозначения нулевой изотермы:

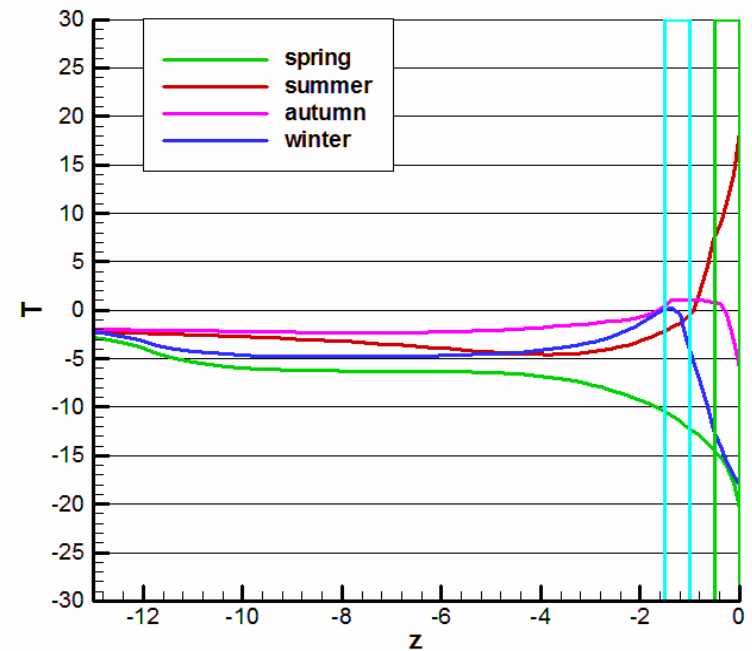
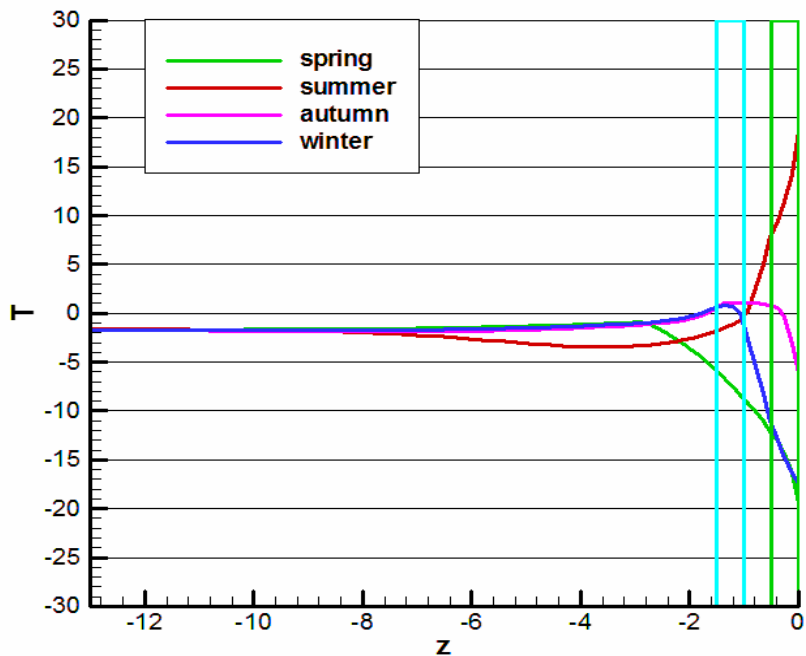
**10** – зеленая сплошная – через 10 лет.

**15-25** – черная сплошная – практически совпадают, через 15 - 25 лет.

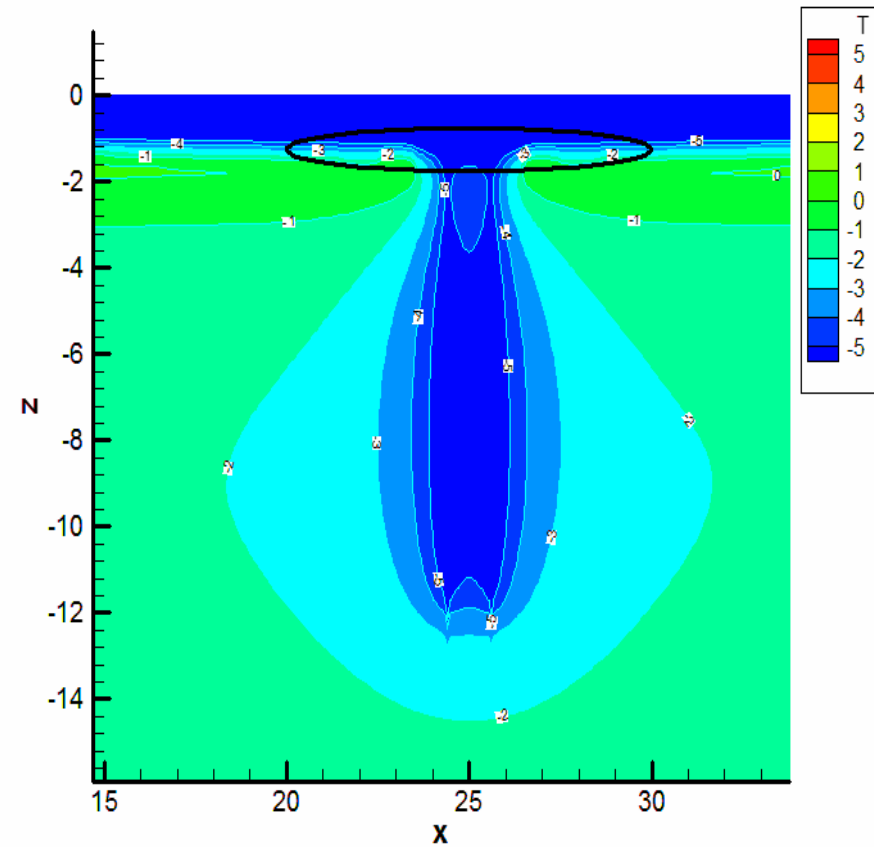
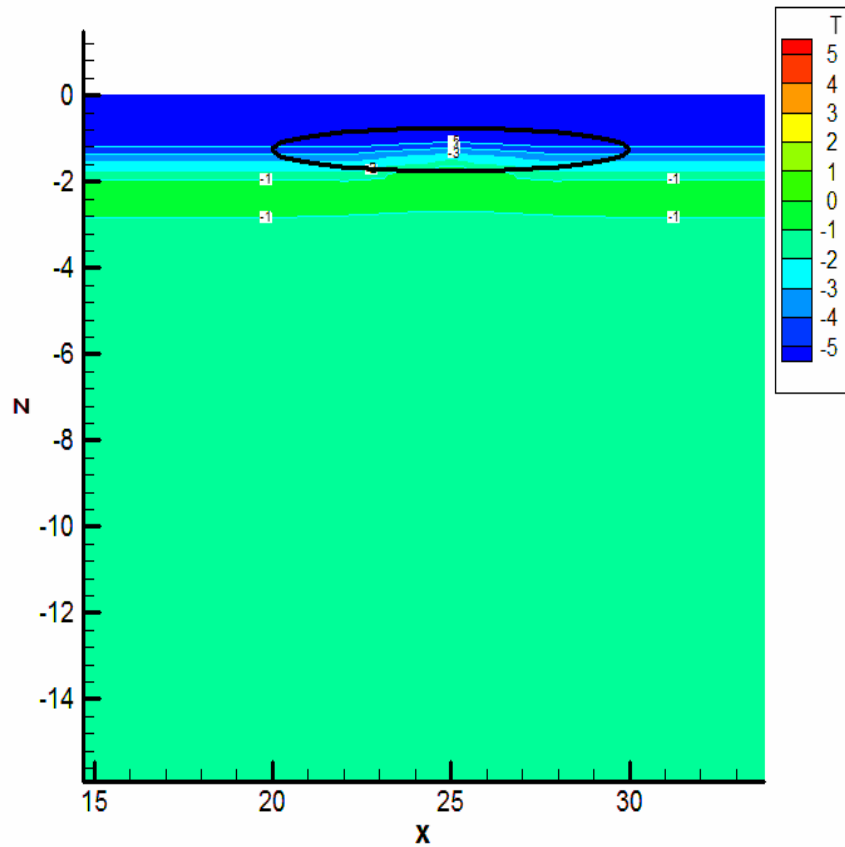
# Производство СОУ( сезоннодействующих охлаждающих устройств) в г.Тюмень



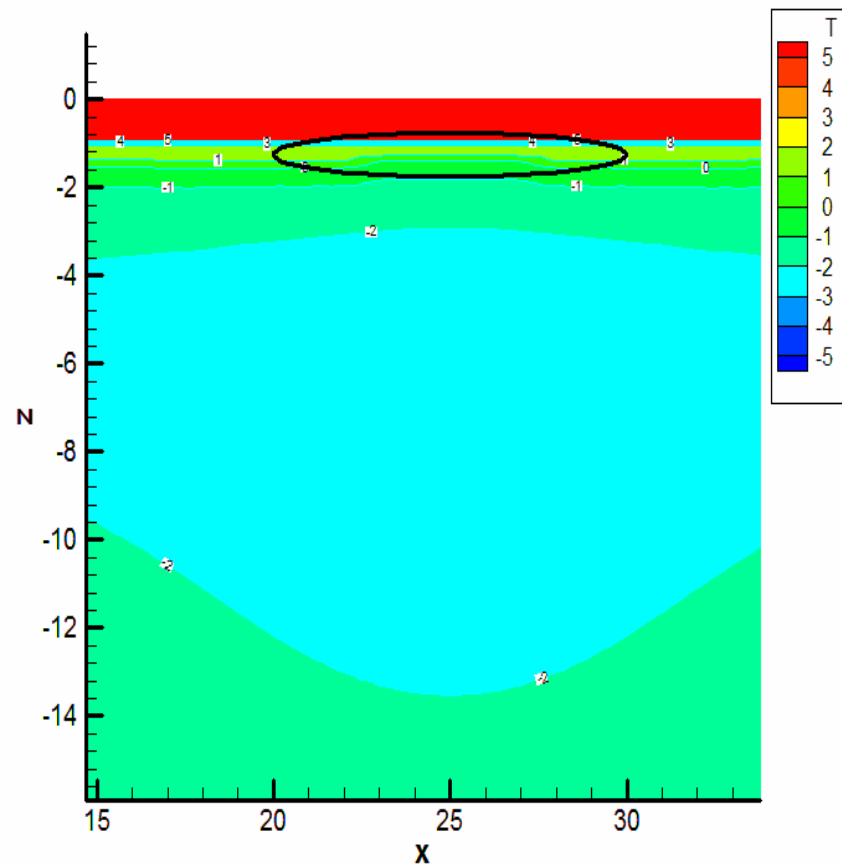
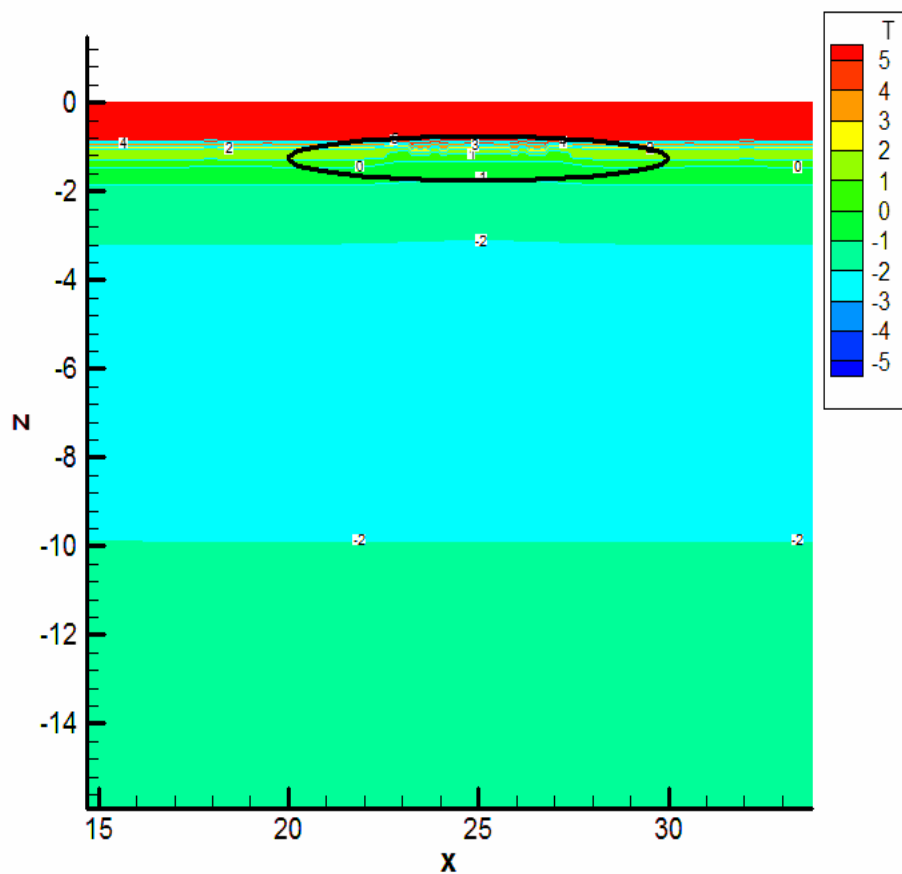
# Сезонное промерзание и оттаивание грунта с «линзой» воды/льда и слоем торфа (слева) и грунта с «линзой» воды/льда, слоем торфа и 2 СОУ (справа)



# Промерзание грунта с линзой льда в январе (слева), промерзание грунта с линзой льда и 2-мя СОУ (справа)

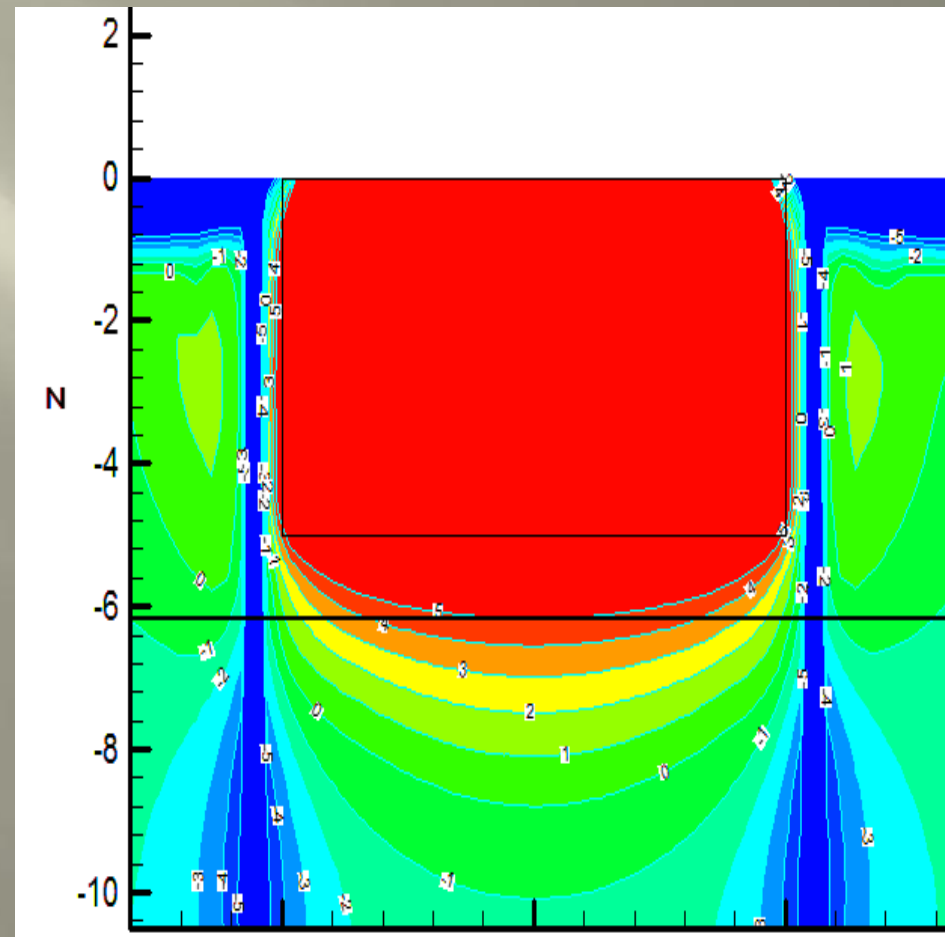
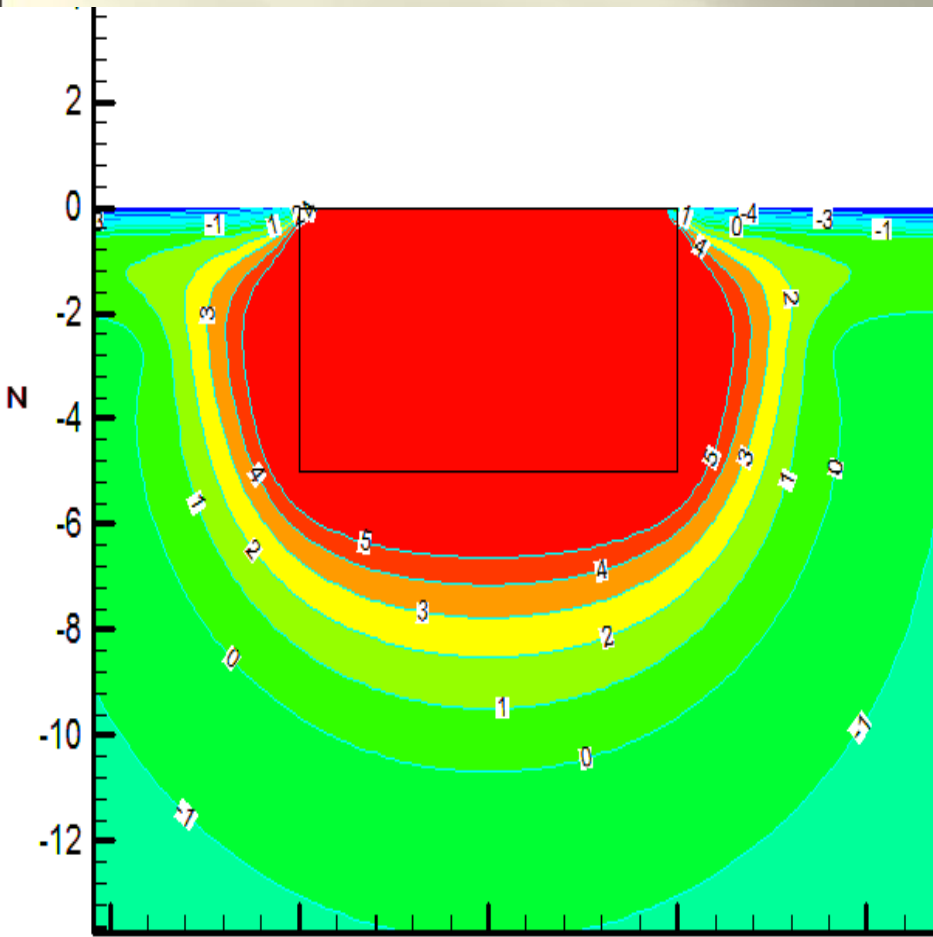


**Оттаивание грунта с линзой льда(воды)  
в августе (слева),  
оттаивание грунта с линзой льда(воды) и  
2-мя отключенными СОУ (справа)**





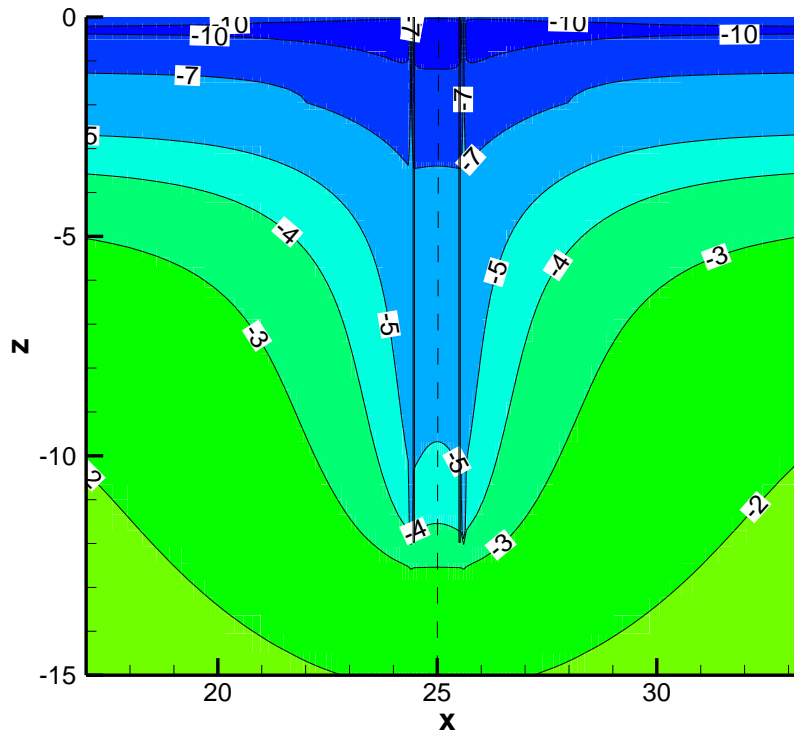
**Круглый бункер радиуса 5м и глубиной 5 м с бетонными стенами толщиной 10 см и температурой внутри +10С  
слева - без СОУ по оси z,  
справа – 8 СОУ**



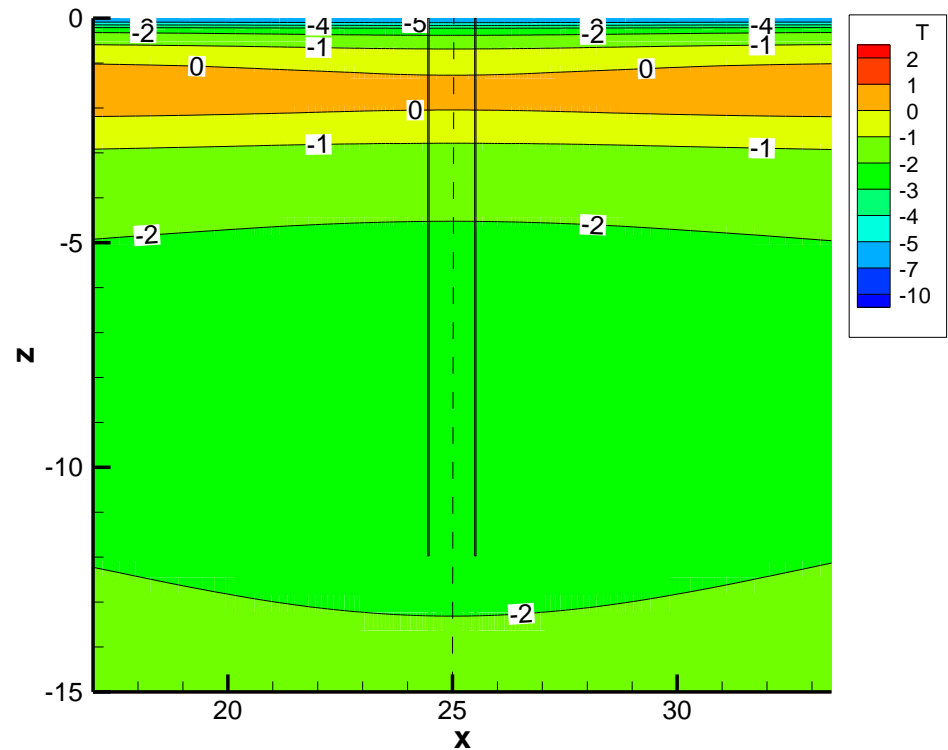
# Промерзание отсыпки с двумя СОУ

Отсыпка состоит из двух слоёв:  
песок (1.7 m) и бетонная плита (0.3m.).

MARCH



SEPTEMBER



## 3.4. Растепление ММП от добывающей скважины с несколькими СОУ.

**Сезонное Охлаждающее Устройство (СОУ):**

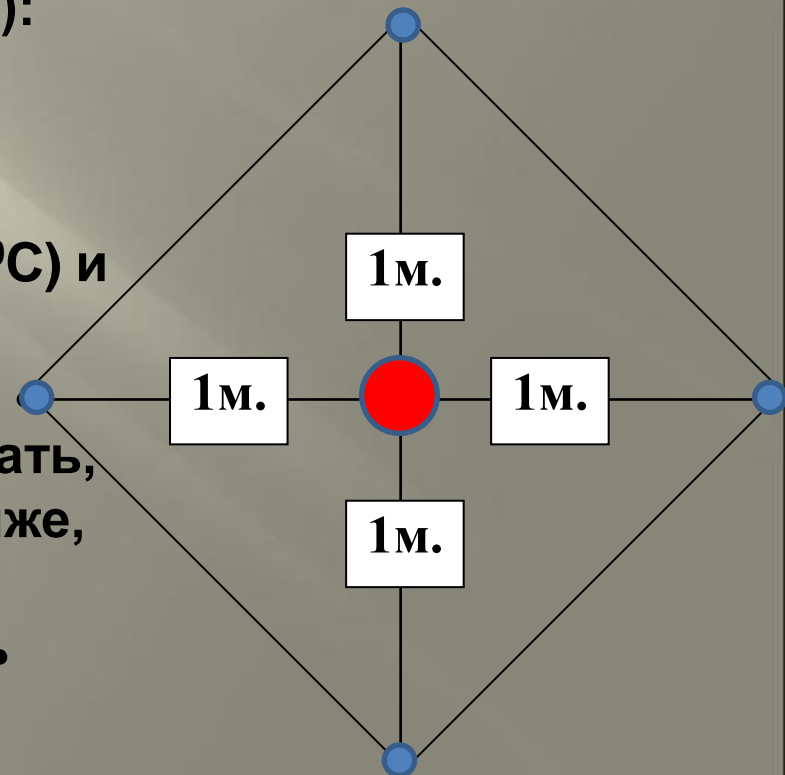
диаметр 0.067 м.

глубина 12 м.

**Одна теплоизолированная скважина (+80<sup>0</sup>С) и 4 СОУ на расстоянии 1 метра («ромб»).**

**Предполагается, что СОУ начинают работать, когда температура воздуха становится ниже, чем температура грунта на дне СОУ.**

**Начало эксплуатации скважины – октябрь  
месяц**

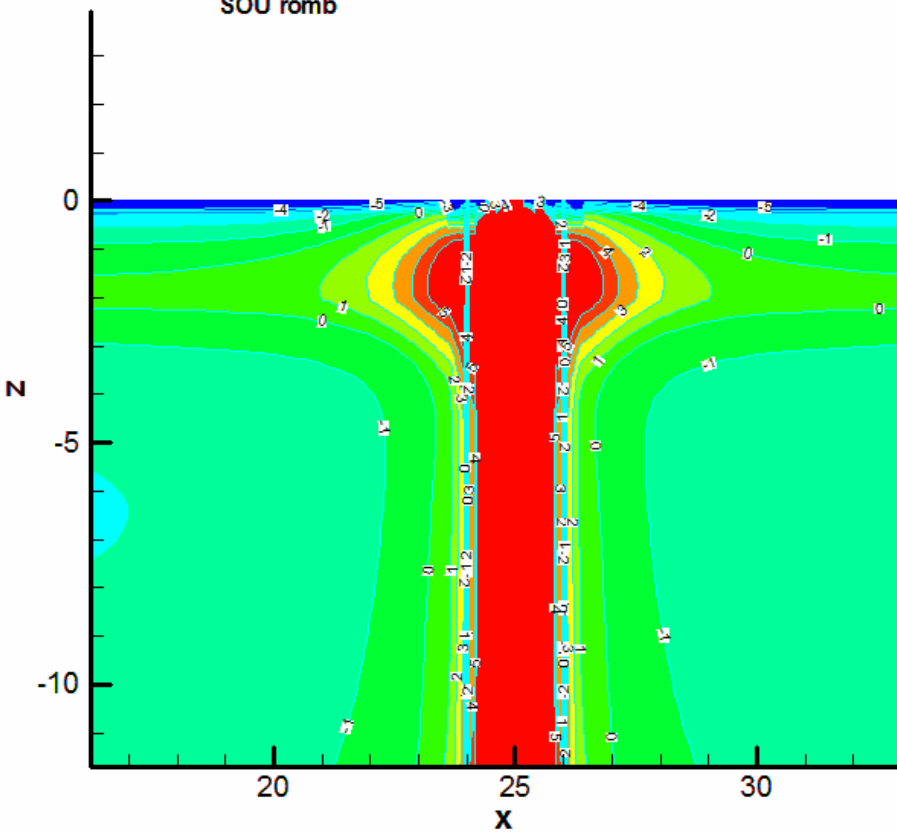


12 месяцев, октябрь

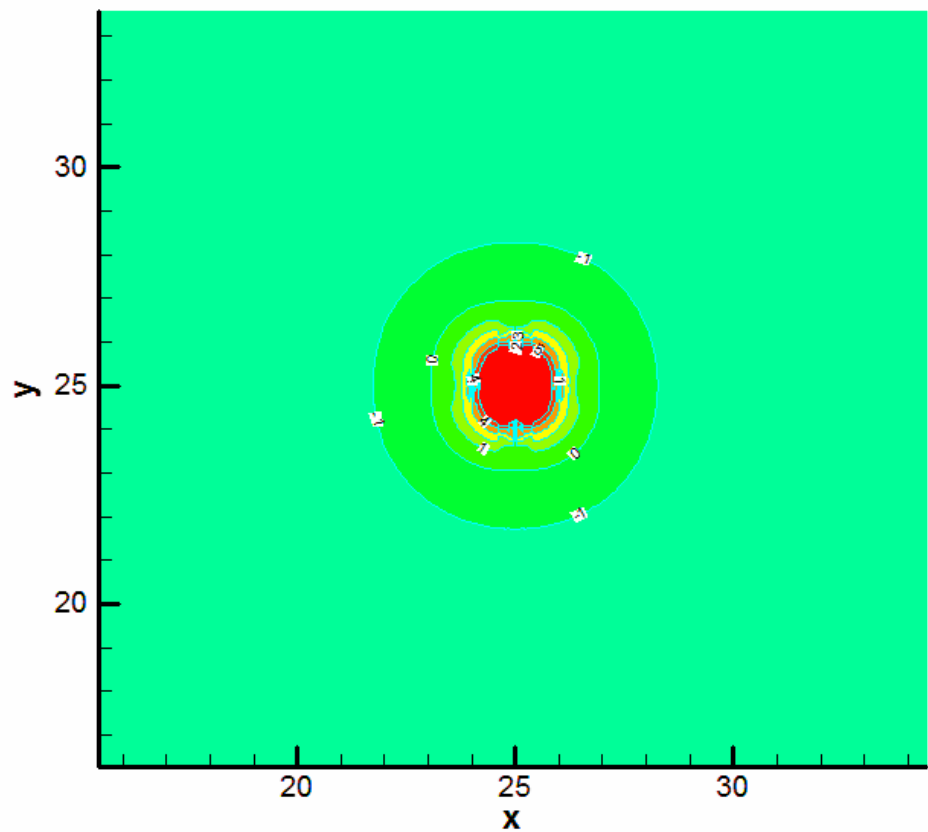
Плоскость (x,z)

Плоскость (x,y),  
Глубина 10 м.

Z3 grunt 2a  
Wtype 0, 80C  
init temp ots apr  
SOU romb



Z4 grunt 2a  
Well 0 80C  
in T ots apr  
SOU romb

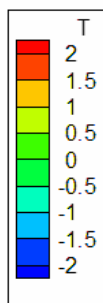
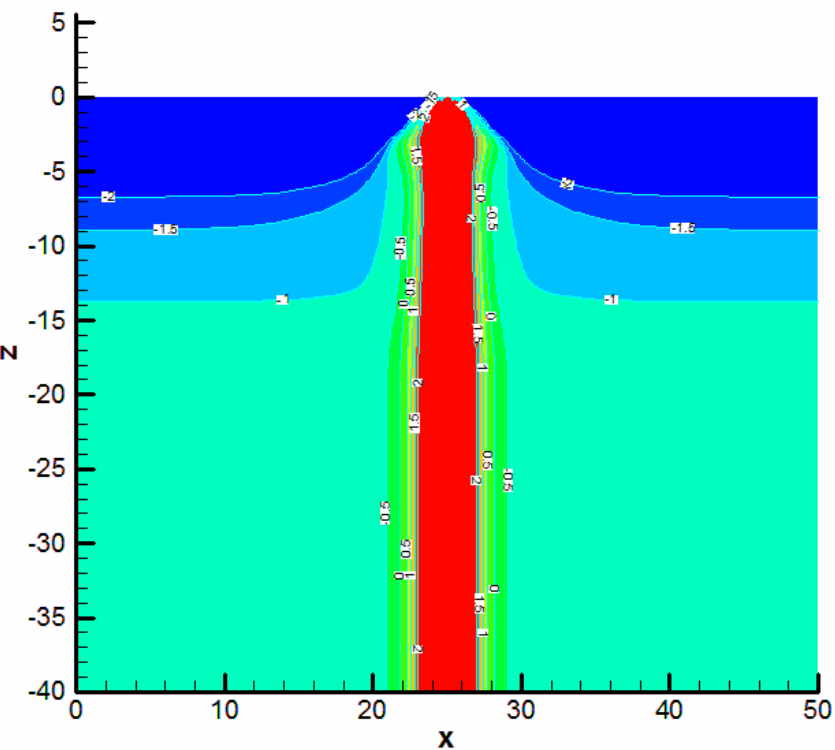


18 месяцев, апрель

(x,z)

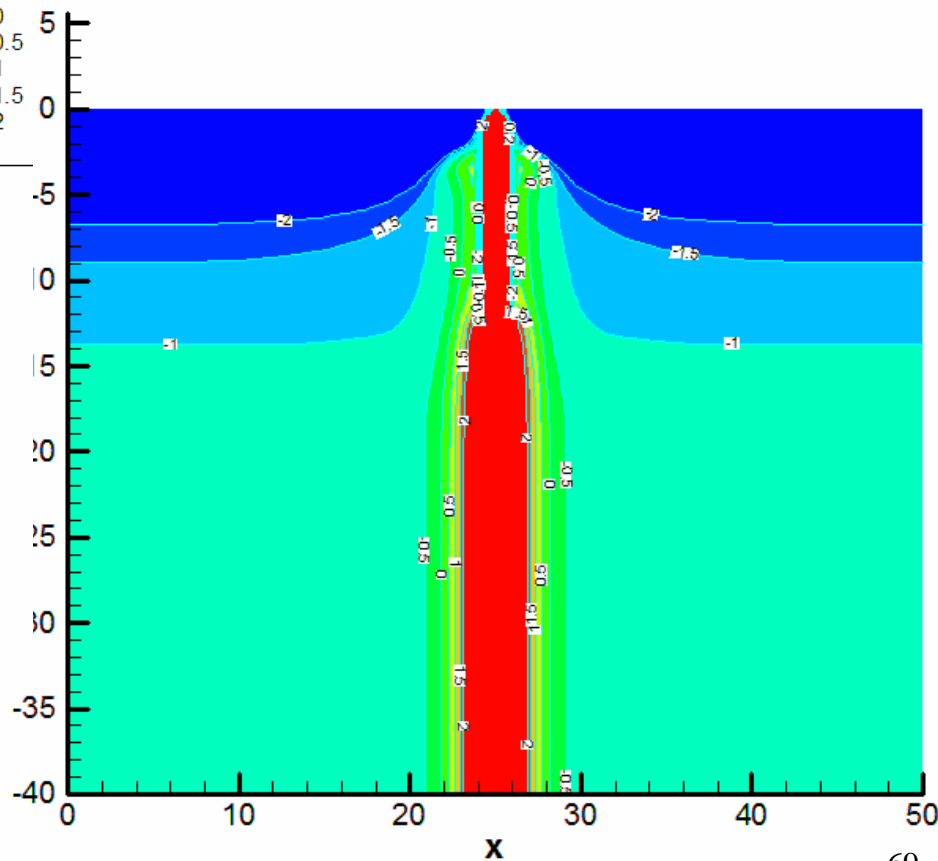
Без СОУ

Z3 grunt 2a  
Wtype 0, 80C  
init temp ots apr  
bez SOU



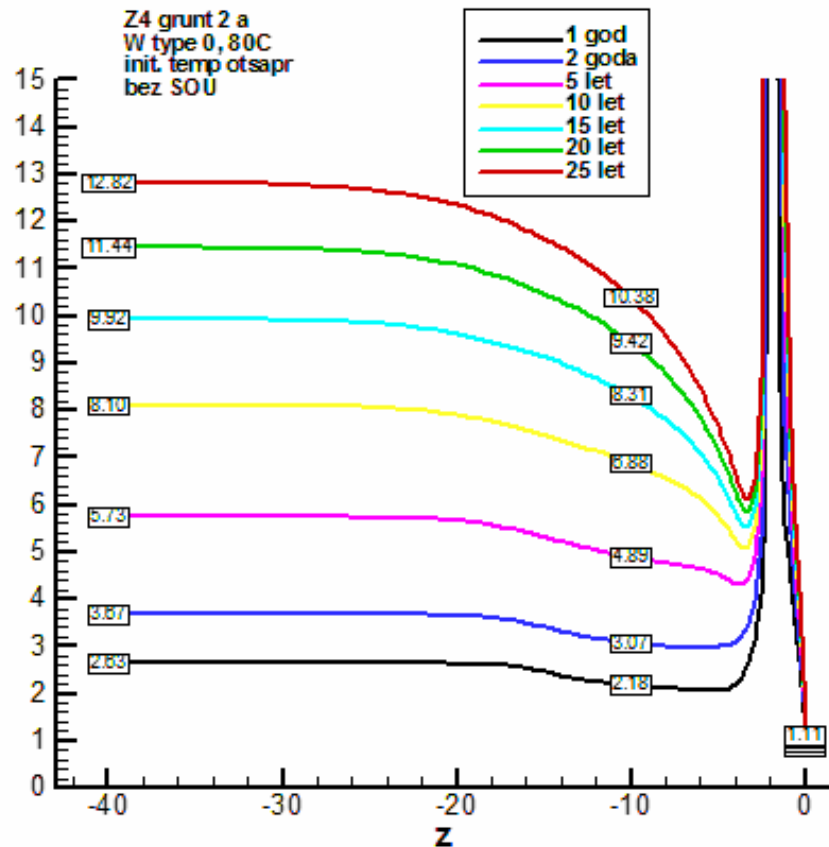
4 СОУ

Z3 grunt 2a  
Wtype 0, 80C  
init temp ots apr  
SOU romb

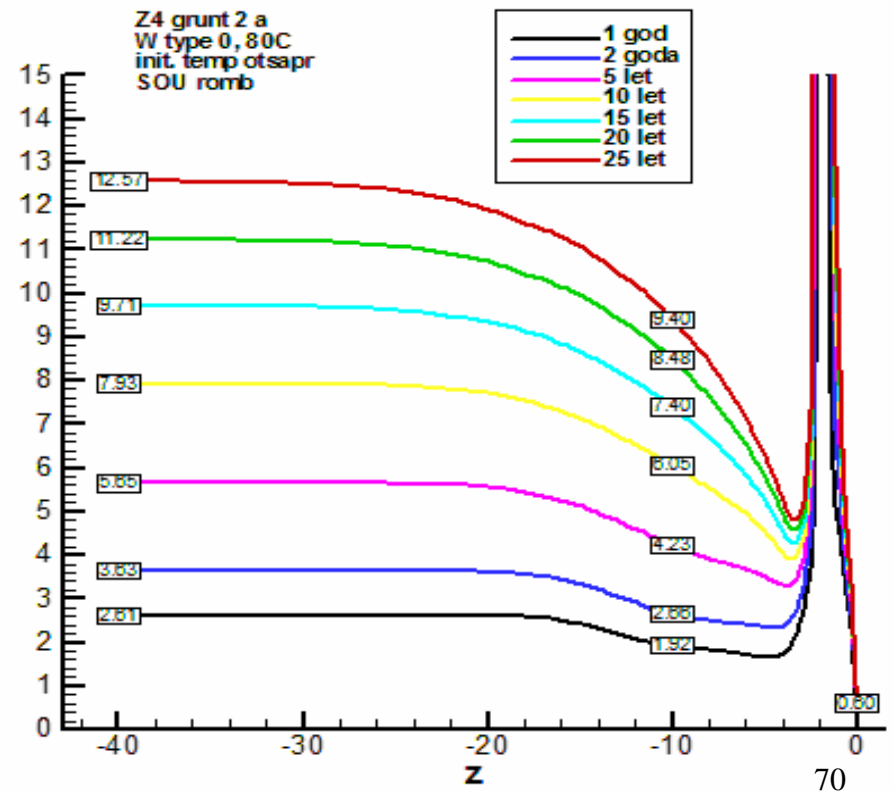


# Радиус растепления.

Без СОУ



4 СОУ



## 5. Внедрение 2010-2011

Результаты численных расчетов по разработанному комплексу программ были использованы на 7 месторождениях:

1. При разработке для Сузунского и Тагульского нефтегазовых месторождений Регламента BOL-SS-R226-500-PE-MAN-0001-R от 15 октября **2010 г.** Регламент на основе заключения экспертизы промышленной безопасности № 244-ЭИД/079/07/10/ИД утвержден в Федеральной службе по экологическому, технологическому и атомному надзору (Ростехнадзору) за номером регистрации № 01-ИД-00075-2010.
2. При разработке «Регламента по размещению газовых и газоконденсатных скважин на кустовых площадках месторождений Ново-Уренгойского и Восточно-Уренгойского лицензионных участков». Регламент на основе заключения экспертизы промышленной безопасности № 1008-ЭИД/129-07-10/ИД утвержден в Федеральной службе по экологическому, технологическому и атомному надзору (Ростехнадзору) за номером регистрации № 57-ИД-03940-2011 от 14 сентября **2011г.**

## Внедрение в 2012 году

- 3. В 2012 году был разработан Регламент: «Технический регламент по размещению устьев скважин на кустовых площадках Западно-Мессояхского и Восточно-Мессояхского лицензионных участков» (регистрационный номер № 57-ИД-03926-2012), на основе экспертизы промышленной безопасности № 01-ИД-0184-12, выданной экспертной организацией ООО «Промтехэкспертиза» Центральный филиал.**
- 4. В 2012 году был разработан и зарегистрирован за номером № 57-ИД-08740-2012 "Технический регламент по размещению устьев скважин на кустовых площадках Восточно-Уренгойского ЛУ Валажинской залежи для нефтяных и газовых скважин" на заключения экспертизы промышленной безопасности № 01-ИД-1063-12, выданное ООО "Промтехэкспертиза".**



## 6. Конкурентные преимущества пакета Wellfrost

1. На основе новой математической модели разработан комплекс программ для численного трехмерного моделирования тепловых полей в приповерхностном слое **ММП**, на который **получено свидетельство** о государственной регистрации программы для ЭВМ **№ 2012660988** от 4 декабря 2012 г. (авторы **Ваганова Н.А., Филимонов М.Ю.**, правообладатель ЗАО «НОРДЭКО ЕВРАЗИЯ»)
2. Данный комплекс программ был апробирован на **8** нефтегазовых месторождениях и показал **точность около 5%** при сравнении с экспериментальными данными.
3. В пакет Wellfrost **интегрирована разработанная уникальная методика построения расчетной сетки**, позволяющая строить сетку в сложной трехмерной области, в которой имеются элементы с существенно разными линейными размерами (например, величина расчетной области 70 метров, а толщина теплоизоляции скважины несколько миллиметров).

*Заметим, что коммерческие пакеты типа ANSYS не смогли построить пригодную расчетную сетку для получения правдоподобных результатов.*

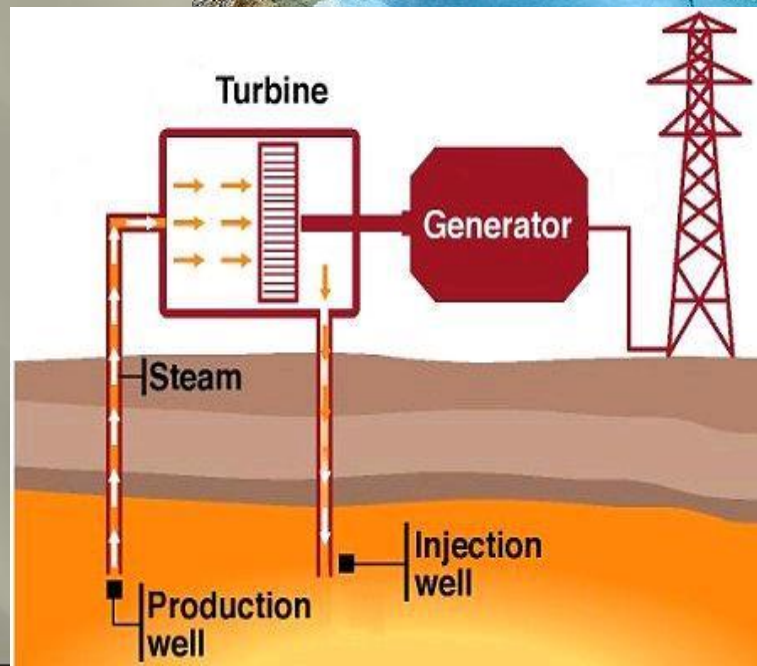
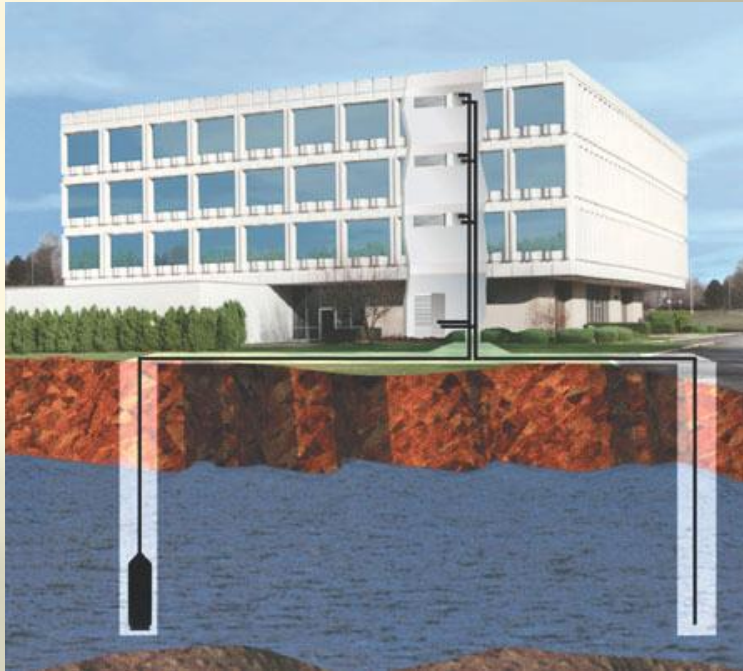


4. Отличительной особенностью пакета Wellfrost от всех других является его **адаптация к выбираемому конкретному географическому месту**, в котором требуется нахождение тепловых полей в грунте. Для этой цели разработан **оригинальный алгоритм, являющийся НОУ-хау** коллектива, который позволяет опосредованно учесть и меняющуюся толщину снега, и число солнечных дней в году, и особенность верхнего слоя грунта и т.п.
5. Проведение численных расчетов по обустройству кустовых площадок для месторождений дает **ощутимый экономический эффект**. В 2012 году проведенные расчеты позволили **сократить на 50% размер рабочих площадок** для размещения устьев добывающих нефтяных скважин для Восточно-Уренгойского ЛУ Валажинской залежи.

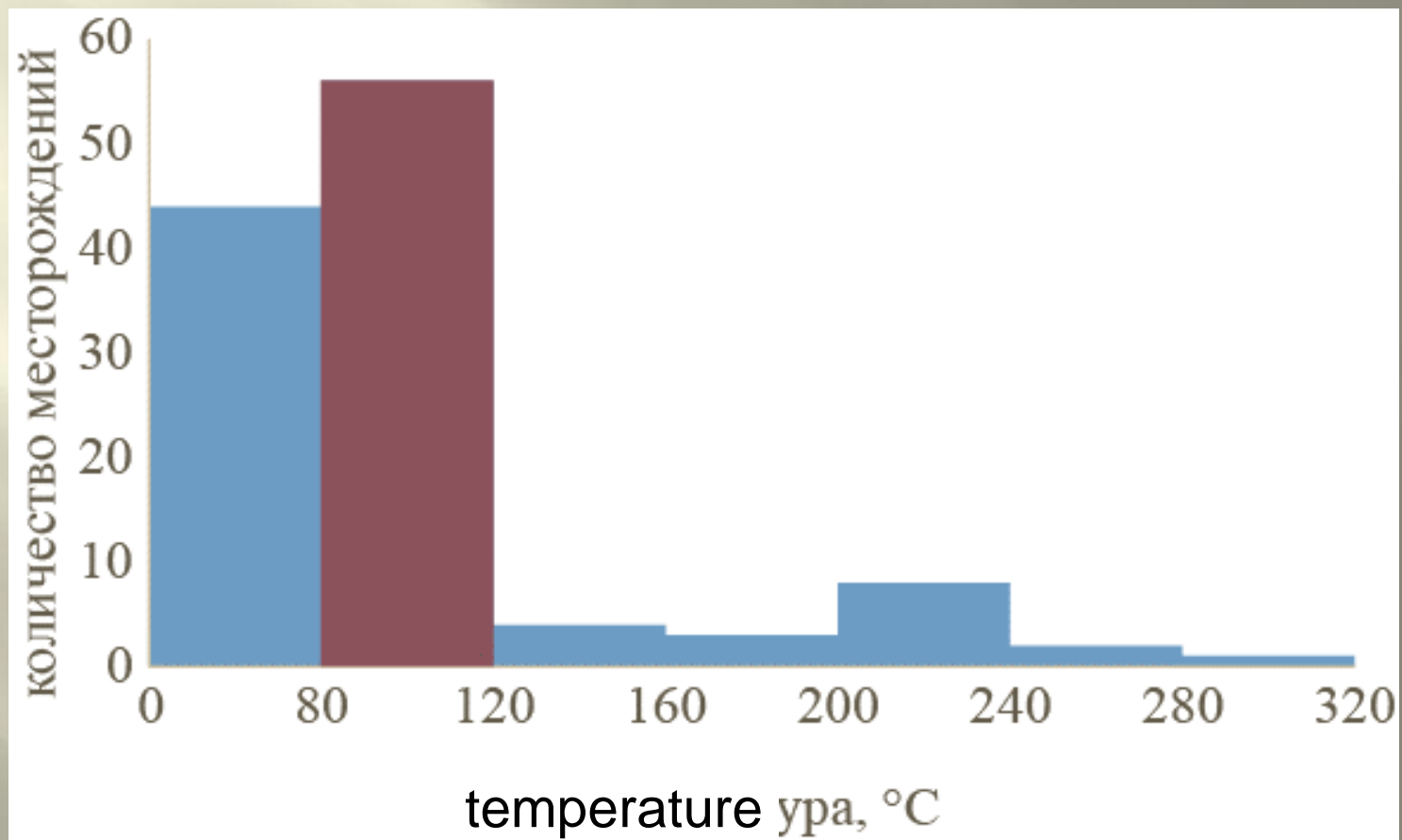
# ОСНОВНЫЕ ПУБЛИКАЦИИ ПО ММП

1. Mikhail Yu. Filimonov, Nataliia A. Vaganova. [Simulation of Thermal Fields in the Permafrost With Seasonal Cooling Devices](#) // Proc. ASME. 45158, Volume 4: Pipelining in Northern and Offshore Environments; Strain-Based Design; Risk and Reliability; Standards and Regulations 133. 2012. pp. 133-141. [doi:10.1115/IPC2012-90287](https://doi.org/10.1115/IPC2012-90287) .
2. M. Yu. Filimonov, N. A. Vaganova [Simulation of thermal stabilization of soil around various technical systems operating in permafrost](#) // Applied Mathematical Sciences, Vol. 7, 2013, no. 144 , pp. 7151-7160. <http://dx.doi.org/10.12988/ams.2013.311669> .
3. Ваганова Н.А., Филимонов М.Ю. Прогнозирование изменений в вечной мерзлоте и оптимизация эксплуатации инженерных систем // Вестник Новосибирского государственного университета. Серия: Математика, механика, информатика. 2013. Т. 13. № 4. С. 37-42.
4. Mikhail Filimonov and Nataliia Vaganova. Prediction of changes in permafrost as a result technogenic effects and climate // Academic Journal of Science. – Vol. 3. № 1. 2014. P. 121–128
5. M.Yu. Filimonov and N.A. Vaganova. Simulation of Technogenic and Climatic Influences in Permafrost // Lecture Notes in Computer Science. 2015. V. 9045. P. 178-185.

# Задачи геотермии



# Распределение геотермальных месторождений по температуре



## II. Постановка задачи геотермии

13 пласт Ханкальского месторождения

Мощность пласта: 40-50 м

Пластовая температура: 95,2-102 °С

Коэффициент пористости: 24,1% (сред.)

Коэффициент фильтрации: от 1,41 до 2,3 м/сут

Коэффициент проницаемости:  $(2,5-4,75) \times 10^7$  м<sup>2</sup>/сут

Коэффициент водопроводимости: 59,2-135,0 м<sup>2</sup>/сут

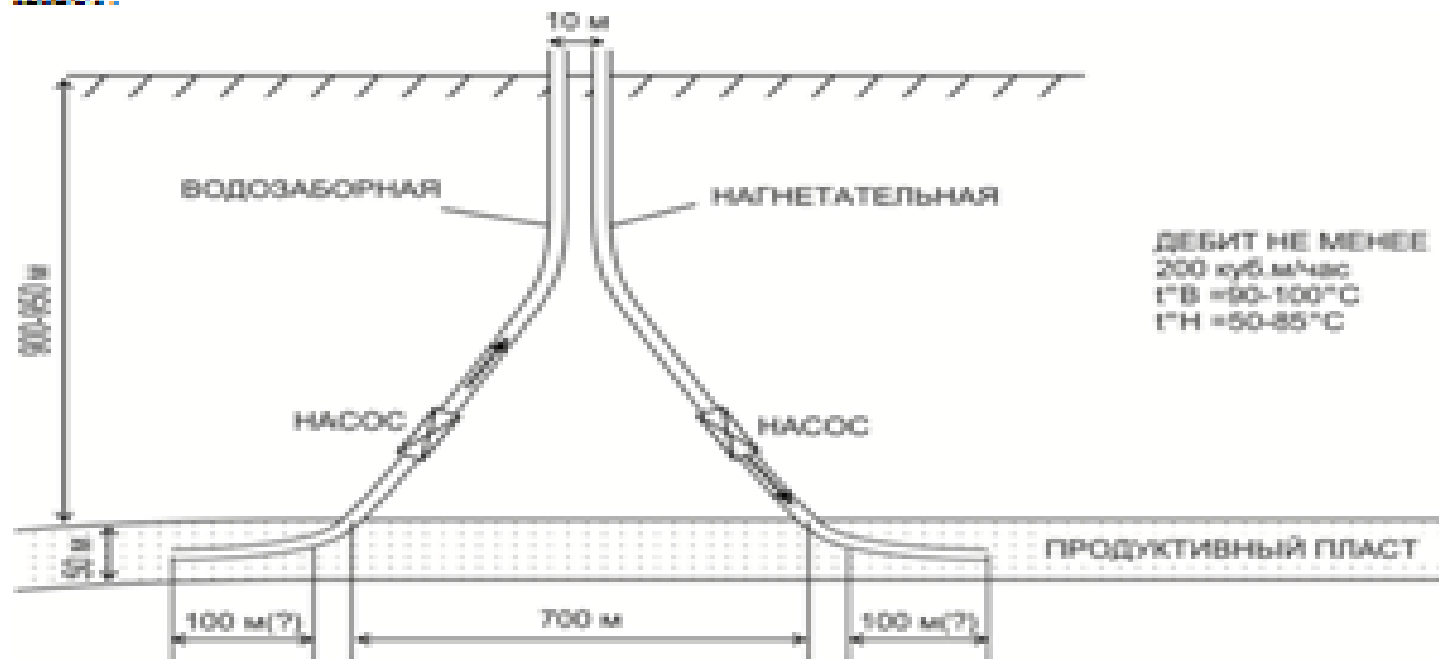
Проницаемость: до  $2,8 \times 10^{-12}$  м<sup>2</sup> (по отчету 1964-го года проницаемость: 1,04-2,85 Дарси параллельно напластованию песч., 1,24-4,18 Дарси перпендикулярно)

Коэффициент теплопроводности песчанников: 2,06-2,6 Вт/м град.

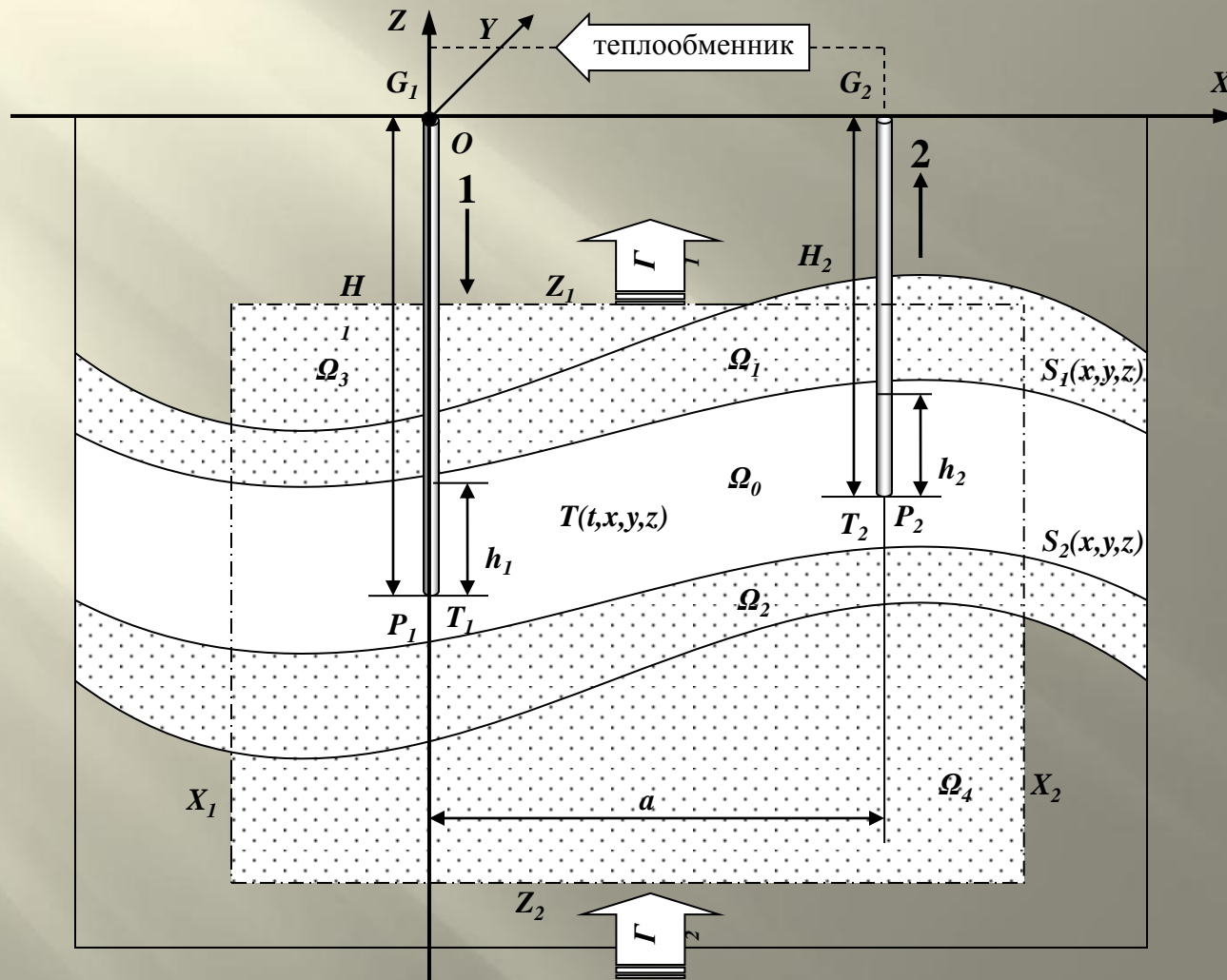
Коэффициент теплопроводности глины (огранич. слой): 1,23-1,7 Вт/м град.

Дебиты в старых скважинах были от 1092 м<sup>3</sup>/сут до 1320 м<sup>3</sup>/сут

Планируется установка данного дублета на 13 пласт:



# Моделирование распределения температуры в пределах резервуара геотермальных вод



# Уравнения подземной гидродинамики

$$\frac{1}{\sigma} \left( \frac{\partial q_x}{\partial t} + \frac{\partial q_x}{\partial x} q_x + \frac{\partial q_x}{\partial y} q_y + \frac{\partial q_x}{\partial z} q_z \right) = -\frac{1}{\rho} \frac{\partial p}{\partial x} - \frac{g q_x}{k}$$

$$\frac{1}{\sigma} \left( \frac{\partial q_y}{\partial t} + \frac{\partial q_y}{\partial x} q_x + \frac{\partial q_y}{\partial y} q_y + \frac{\partial q_y}{\partial z} q_z \right) = -\frac{1}{\rho} \frac{\partial p}{\partial y} - \frac{g q_y}{k}$$

$$\frac{1}{\sigma} \left( \frac{\partial q_x}{\partial t} + \frac{\partial q_z}{\partial x} q_x + \frac{\partial q_z}{\partial y} q_y + \frac{\partial q_z}{\partial z} q_z \right) = -\frac{1}{\rho} \frac{\partial p}{\partial z} - \frac{g q_z}{k} - g$$

$$\frac{\partial q_x}{\partial x} + \frac{\partial q_y}{\partial y} + \frac{\partial q_z}{\partial z} = 0$$

**Неизвестных функции ( $q_x, q_y, q_z, p$ )**

**$Q=(q_x, q_y, q_z)$  - вектор расхода через  
единичную площадку**



## Уравнение для компонент средней скорости после линеаризации

$$\frac{\partial u}{\partial t} = -\frac{1}{\rho} \frac{\partial p}{\partial x} - \frac{g \sigma u}{k}$$

$$\frac{\partial v}{\partial t} = -\frac{1}{\rho} \frac{\partial p}{\partial y} - \frac{g \sigma v}{k}$$

$$\frac{\partial w}{\partial t} = -\frac{1}{\rho} \frac{\partial p}{\partial z} - \frac{g \sigma w}{k} - g$$

$$\frac{\partial u}{\partial x} + \frac{\partial v}{\partial y} + \frac{\partial w}{\partial z} = 0$$

# Уравнение конвективного теплопереноса

*Пусть  $T=T(t,x,y,z)$  – распределение температуры в пласте в момент времени  $t$ . Тогда уравнение для температуры в водоносном слое будет иметь вид*

$$\frac{\partial T}{\partial t} + b \left( \frac{\partial T}{\partial x} u + \frac{\partial T}{\partial y} v + \frac{\partial T}{\partial z} w \right) = \lambda_0 \Delta T$$

$$\lambda_0 = \frac{\kappa_0}{\rho_0 c_0 (1 - \sigma) + \rho c_f \sigma} \quad b = \frac{\sigma \rho c_f}{\rho_0 c_0 (1 - \sigma) + \rho c_f \sigma}$$

$\rho_0$  ( $\rho$ ) – плотность грунта коллектора (воды),  $c_0$  ( $c_f$ ) – удельная теплоемкость грунта коллектора (воды),  $\kappa_0$  – коэффициент теплопроводности грунта коллектора.

# Численный метод решения для ГЦС

$$\left( \frac{\partial^2 p}{\partial x^2} + \frac{\partial^2 p}{\partial y^2} + \frac{\partial^2 p}{\partial z^2} \right) = 0$$

$$\frac{\partial p}{\partial t} = \omega \Delta p$$

где  $\omega$  – коэффициент пьезопроводности.

# Точные решения для уравнения движения жидкости в продуктивном пласте

$$u = \frac{k(P_1 - P_2)}{\rho g \sigma a} \left( 1 - e^{-\frac{g \sigma t}{k}} \right),$$

где  $k$  – усредненный коэффициент фильтрации в водоносном слое,  
 $a$  – расстояние между нагнетательной и добывающей скважинами в продуктивном слое.

С течением времени решение стремится к стационарному решению

$$u_0 = \frac{k(P_1 - P_2)}{\rho g \sigma a}.$$

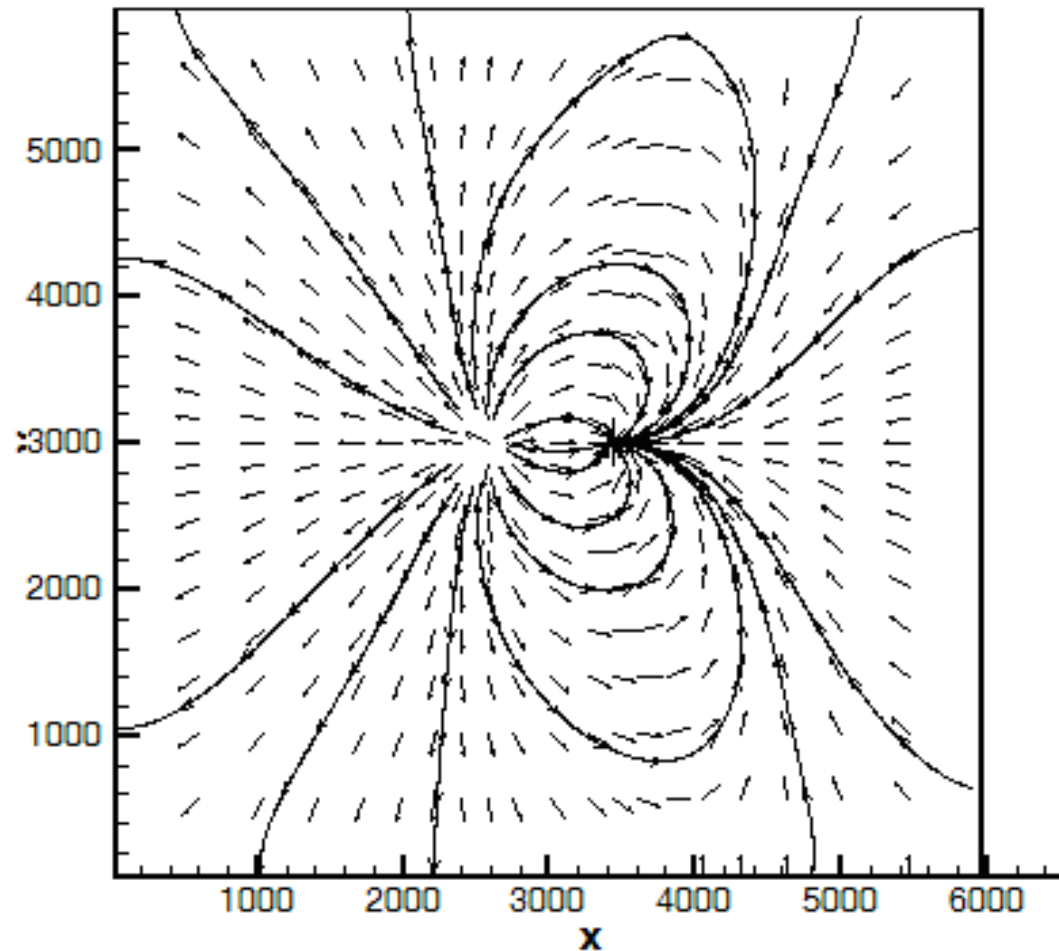
## Точные решения с $v$ не равным нулю

$$u = C_1 e^{-\frac{g\sigma t}{k}} x + \frac{k(P_1 - P_2)}{\rho g \sigma a} \left( 1 - e^{-\frac{g\sigma t}{k}} \right),$$

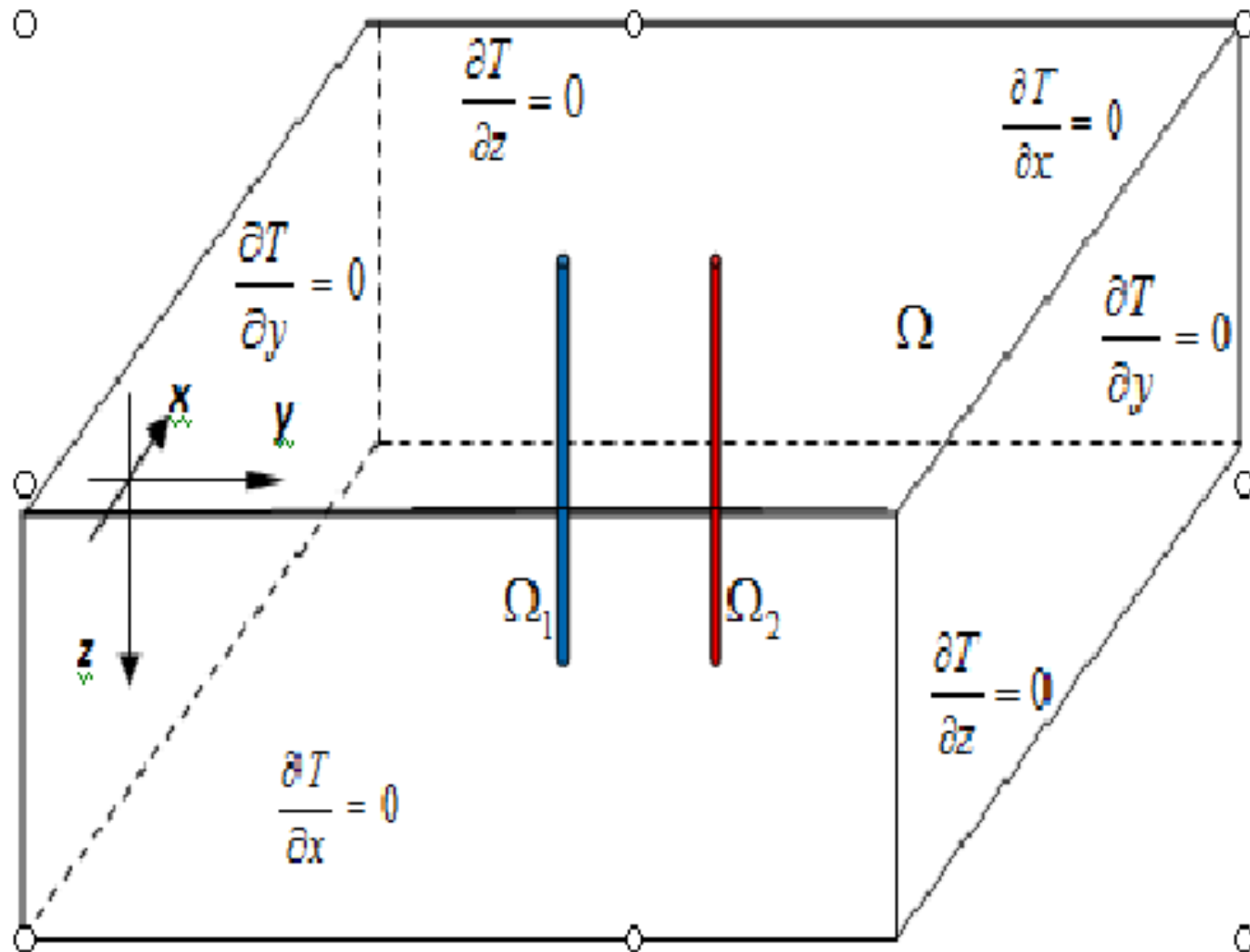
$$v = E_1 e^{-\frac{g\sigma t}{k}} y.$$

**Таким образом, приведенные частные решения с течением времени стремятся к стационарному решению.**

# Численное стационарное решение (поле скоростей)



# Схема расчетной области



# Параметры расчетов

- ▣ *Расчетная область представляет собой параллелепипед размера 6000мx6000м.x50м. Выбор таких больших размеров расчетной области связан с уменьшением влияния граничных условий на границе расчетной области.*
- ▣ *Размер сетки: 201x201x51=2060451 узел.*
- ▣ *Расстояние между скважинами: 800 м.*

## Теплофизические параметры:

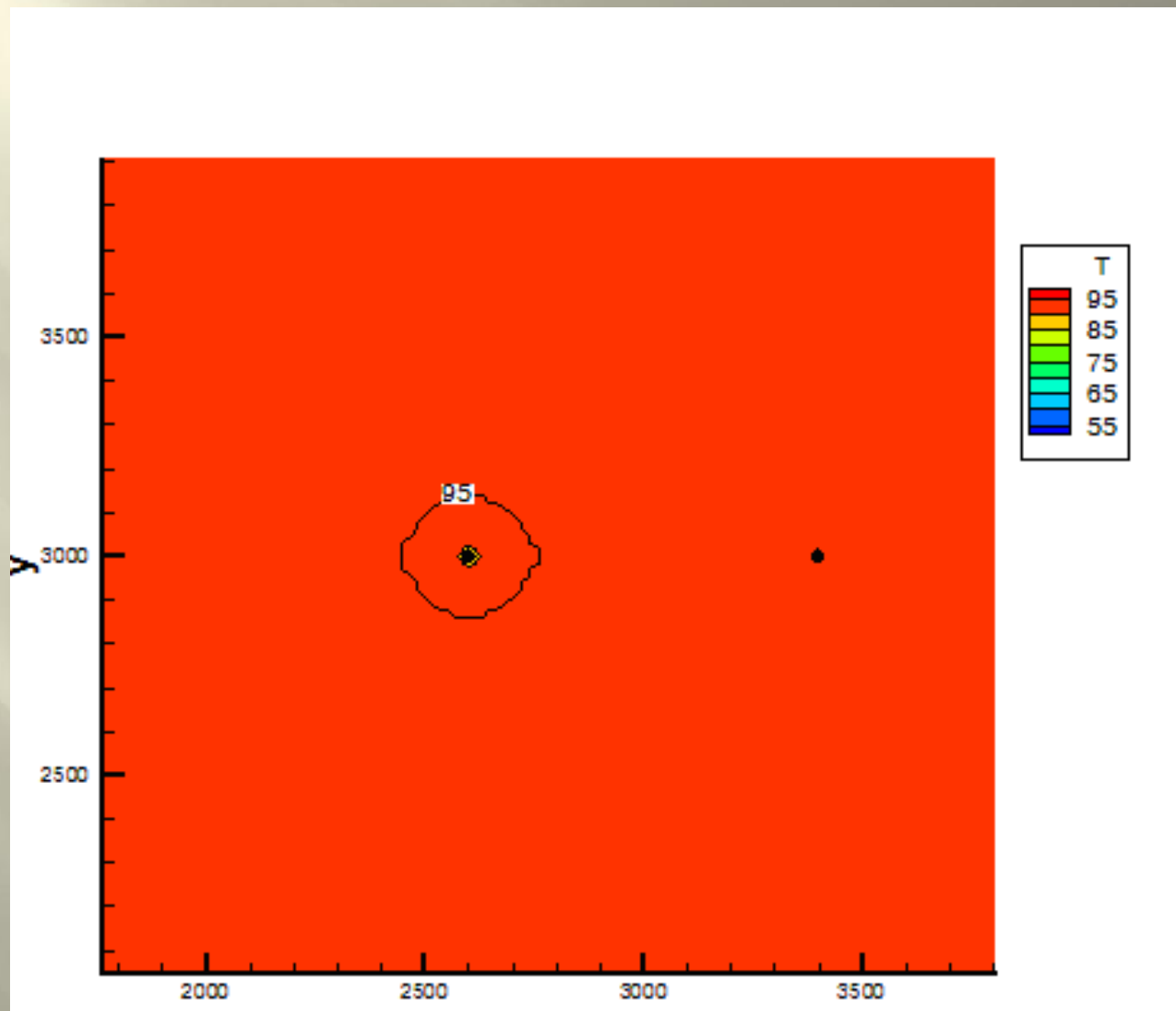


	Грунт (песчаник)	Жидкость (вода)
Теплопроводность [Вт/мК]	2.00	-
Плотность [кг/м <sup>3</sup> ]	-	1000
Удельная теплоемкость,	-	4.18 10 <sup>3</sup>
Объемная теплоемкость,	2.15 10 <sup>6</sup>	
Скорость фильтрации [м/с]	1.7 10 <sup>-5</sup>	
Пористость	0.241	

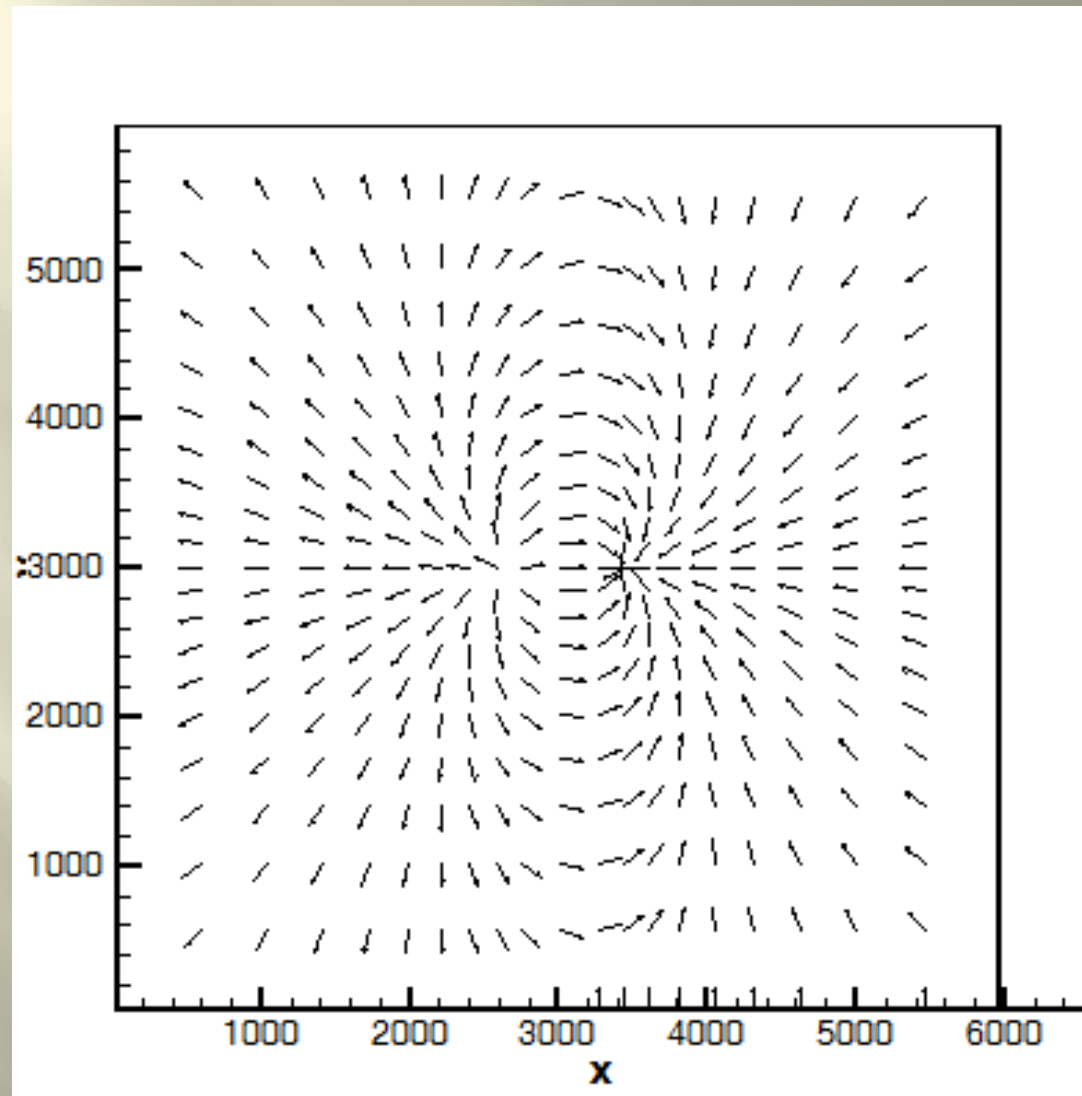
Начальная температура воды в продуктивном слое: 95С,



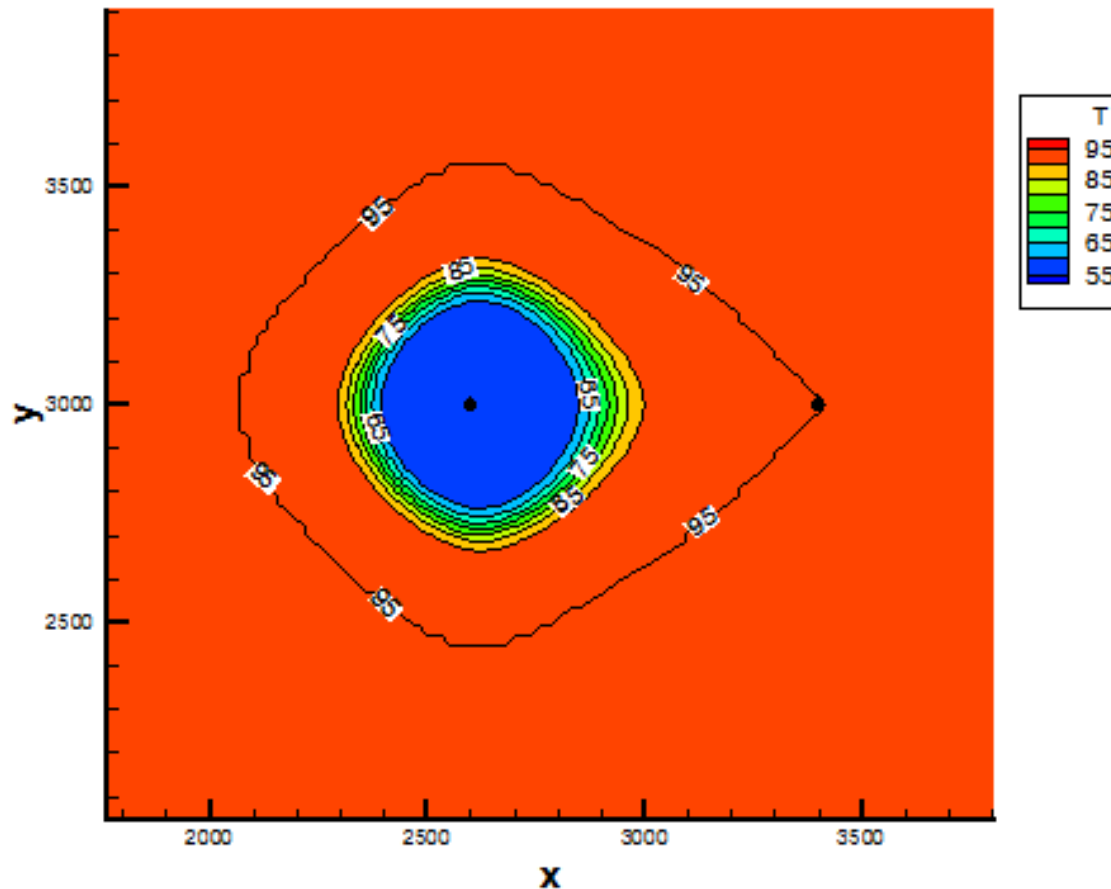
# ВАРИАНТ 0. МОДЕЛИРОВАНИЕ ТЕМПЕРАТУРЫ БЕЗ УЧЕТА ДВИЖЕНИЯ ЖИДКОСТИ. 10 лет.



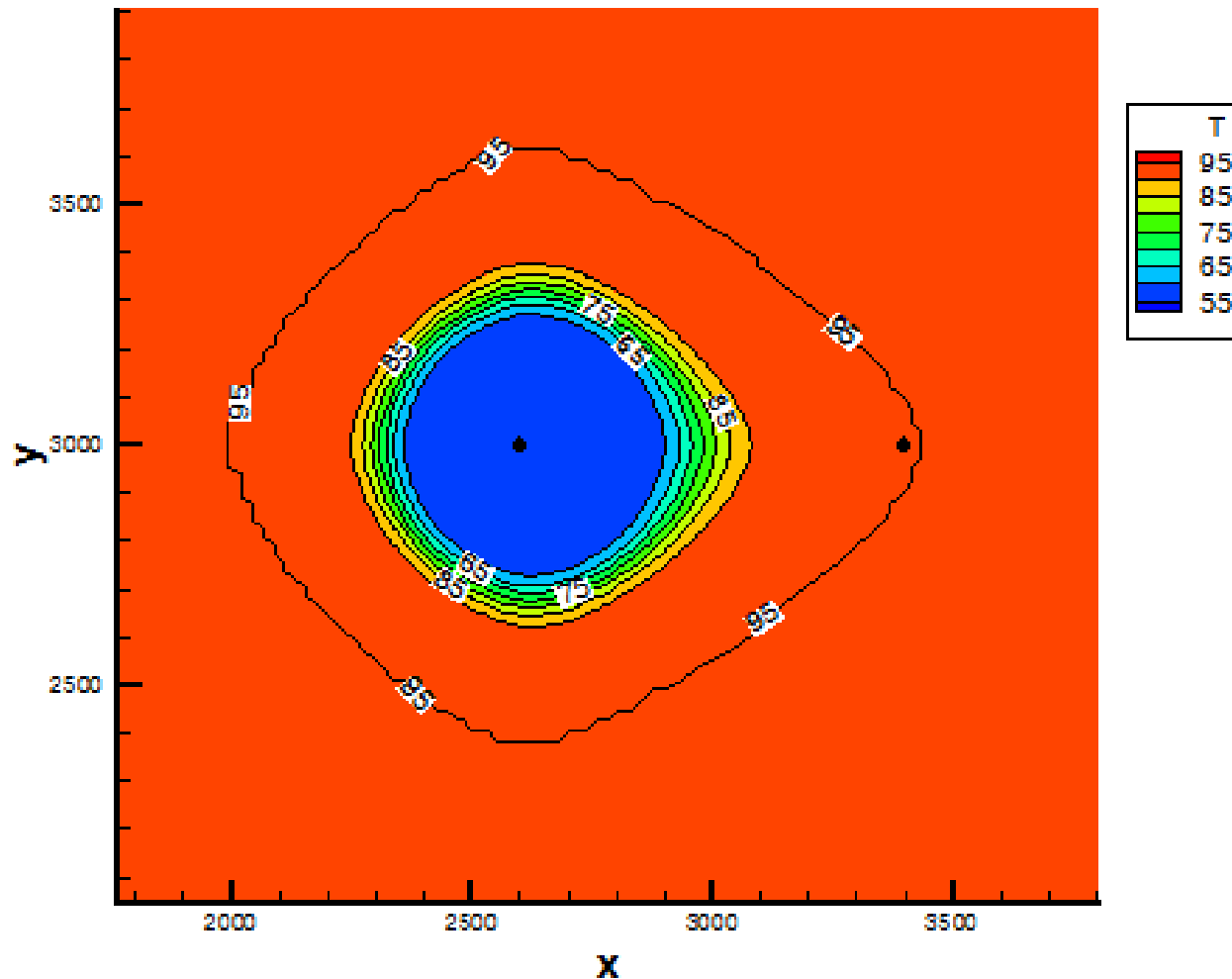
# ВАРИАНТ 1. Поле скоростей (векторы выровнены по модулю)



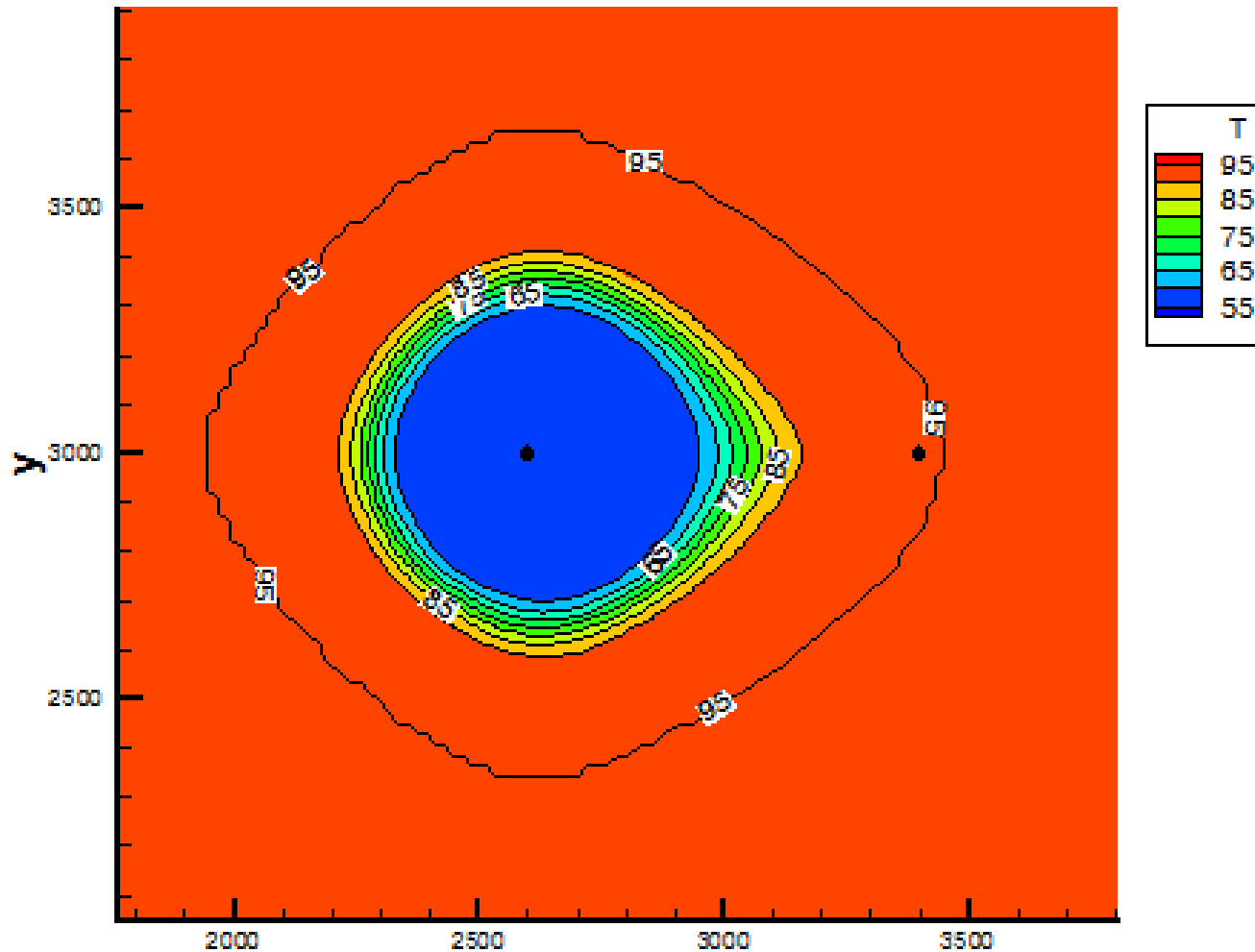
# ВАРИАНТ 1. Температурное поле для 15 лет работы скважин



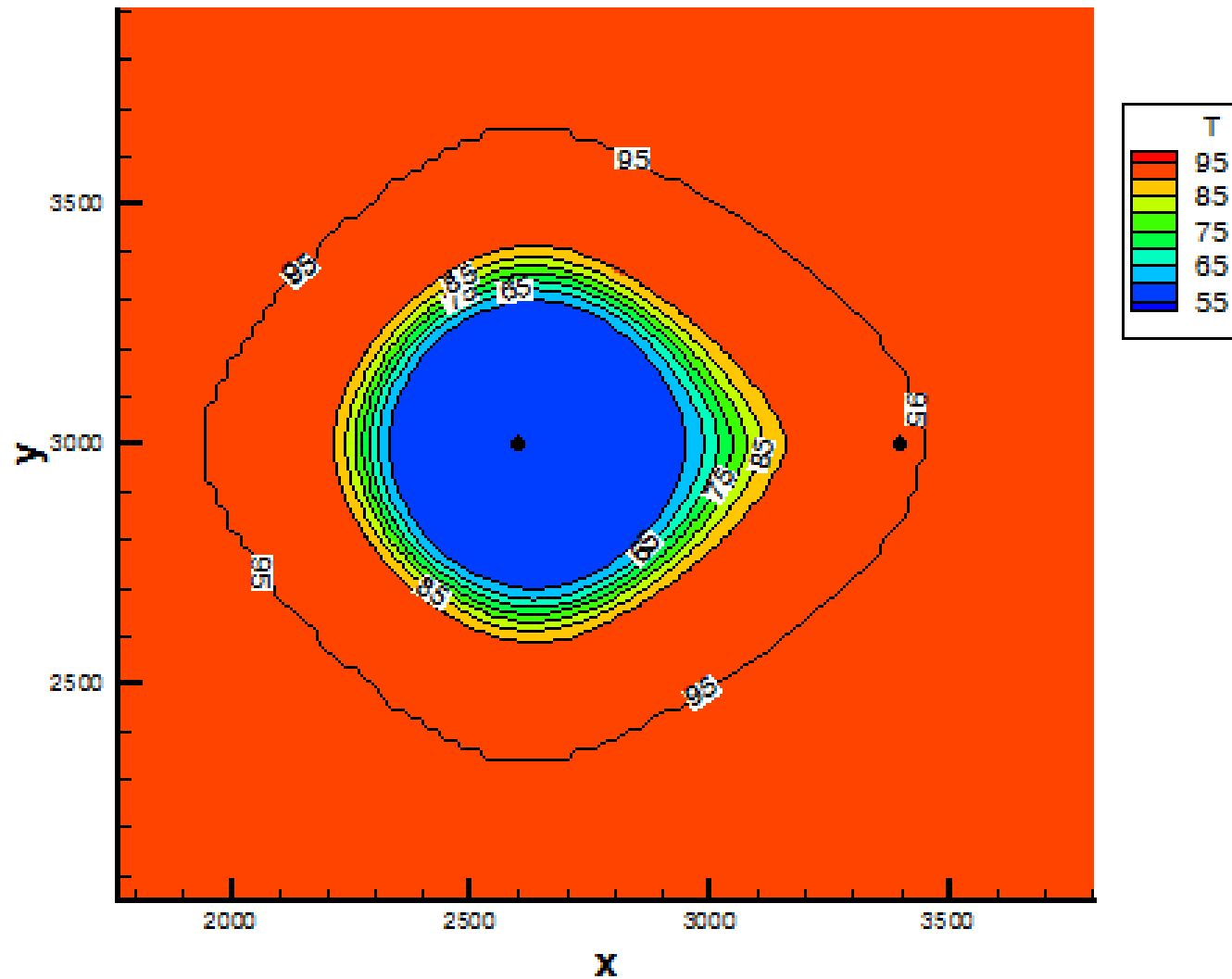
# ВАРИАНТ 1. Температурное поле для 20 лет работы скважин



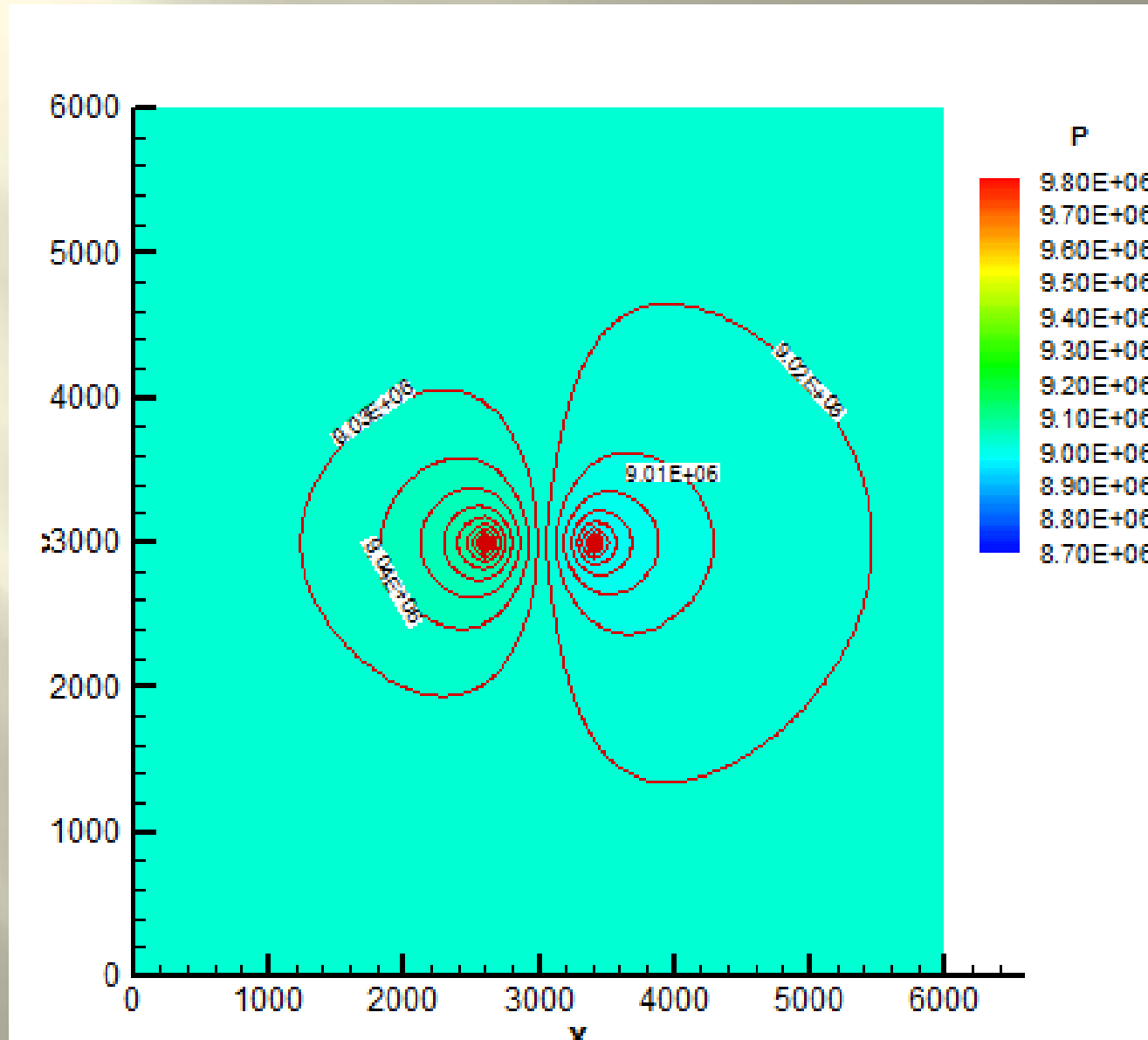
# ВАРИАНТ 1. Температурное поле для 25 лет работы скважин



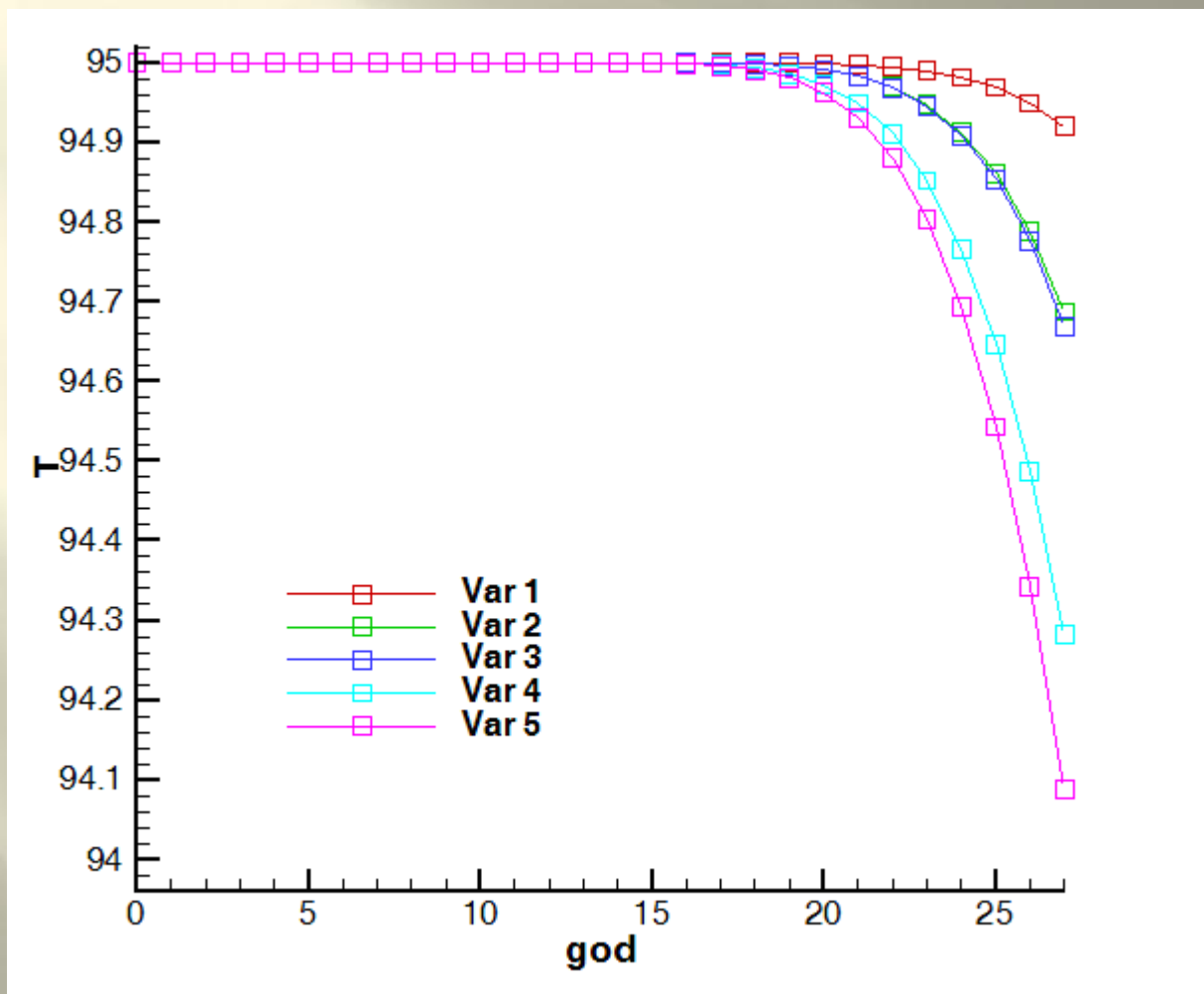
# ВАРИАНТ 1. Температурное поле для 30 лет работы скважин



# ВАРИАНТ 1. Поле давления.



# Моделирования распределения температуры в добывающей скважине





## Итоги численного моделирования распределения температуры в пределах резервуара геотермальных вод

1. Таким образом, проведенные расчеты показывают, что при заданном в приведенных вариантах перепаде давления между нагнетательной и добывающей скважиной температура добываемой воды после 25 лет эксплуатации скважин, практически не понизилась.

2. Более заметное снижение температуры воды в добываемой скважине начинает наблюдаться на 29-ый, 30-ый года эксплуатации скважин.


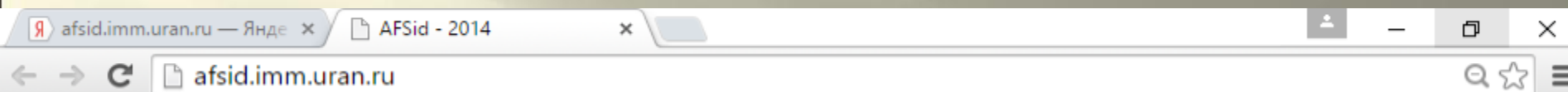
# Выводы

1. На основе новых математических моделях разработаны комплексы программ Wellfrost, GeoTerm и др. для численного трехмерного моделирования нестационарных тепловых полей в приповерхностном слое **ММП от различных технических систем, либо построение тепловых полей в геотермальном резервуаре (ГЦС).**
2. Проведенные расчеты позволили существенно сократить капитальные затраты на этапе проектирования и обустройства северных нефтегазовых и геотермальных месторождений.
3. Для фундаментальных (междисциплинарных) исследований очень полезен симбиоз с производственными фирмами, обладающими реальными и экспериментальными данными.

---

Спасибо за

# АФСИД-2016 (12-17 сентября 2016 г. пансионат «МОРЯК») afsid@imm.uran.ru



## **VII Всероссийская конференция "Актуальные проблемы прикладной математики и механики", посвященная памяти академика А.Ф.Сидорова, и Школа-конференция молодых исследователей**

[регистрация участников](#)

[История](#) | [VII Конференция](#) | [Оргкомитет](#) | [Место проведения](#) | [Участники](#) | [Программа](#) | [Тезисы](#) | [Объявления](#) | [Фотоальбом](#)

### Информация о VII конференции

VII Всероссийская конференция "Актуальные проблемы прикладной математики и механики", посвященная памяти академика А.Ф.Сидорова, и Школа-конференция молодых исследователей будут проходить с **15 по 20 сентября 2014 года** на базе пансионата "Морьяк" Новороссийского морского пароходства (пос. Дюрсо, 40 км. от Новороссийска). Тематика конференций включает в себя следующие направления:

- аналитические методы в задачах газовой динамики и механики сплошной среды;
- оптимизация процессов в задачах тепломассопереноса;
- численные методы решения задач математической физики;
- проблемы построения оптимальных сеток.

#### [Первое информационное письмо](#)

Во время работы конференции будут обсуждены актуальные проблемы прикладной математики и механики, в частности, в области аналитических методов газовой динамики, гидродинамики, теории нелинейных уравнений с частными производными, а также приложения этих методов к расчетам оптимальных параметров процессов протекающих в жидкостях и газах, использование аналитических исследований при решении задач численными