

**Долгосрочное прогнозирование влияния
климатических и техногенных факторов на
деградацию вечной мерзлоты в Арктических и
Приполярных районах**

М.Ю. Филимонов, Н.А. Ваганова

(УрФУ, ИММ УрО РАН)

Екатеринбург, 2017

ОСНОВНЫЕ ПУБЛИКАЦИИ ПО ММП К ДОКЛАДУ

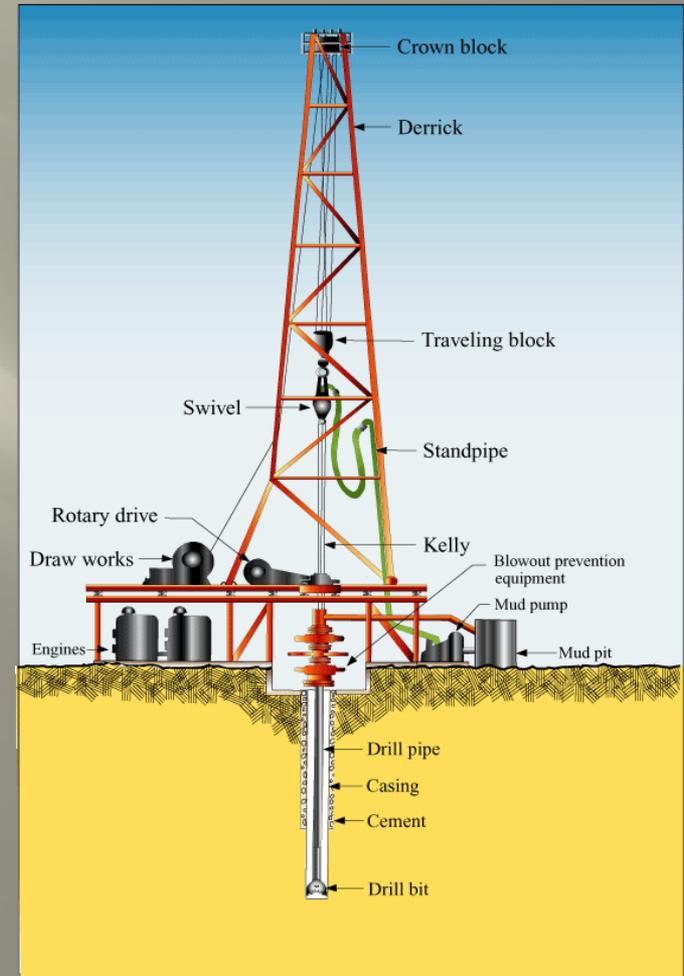
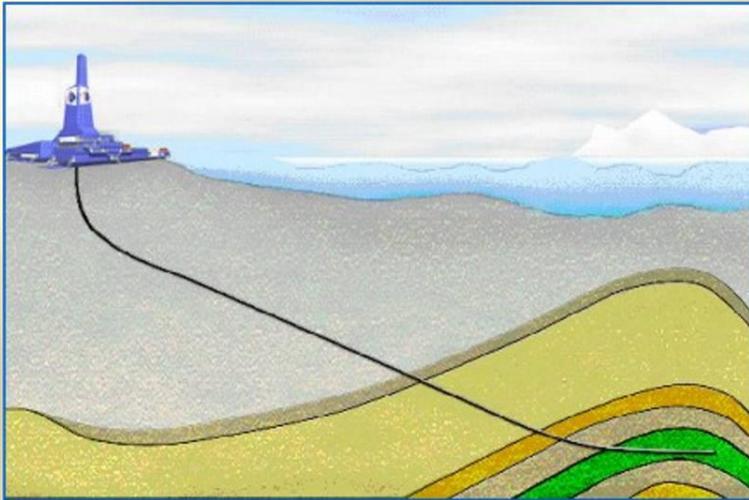
1. Filimonov M.Yu., Vaganova N.A. 2012. [Simulation of thermal fields in the permafrost with seasonal cooling devices](#). Proceedings of the Biennial International Pipeline Conference IPC. 4: 133-141. doi: 10.1115/IPC2012-90287
2. Filimonov M.Y., Vaganova N.A. 2013. [Simulation of thermal stabilization of soil around various technical systems operating in permafrost](#). Applied Mathematical Sciences. 7.(141-144). 7151-7160. doi: 10.12988/ams.2013.311669
3. Филимонов, М.Ю., Ваганова Н.А. Моделирование теплового воздействия от вертикальных факельных установок на вечную мерзлоту // Экология. Экономика. Информатика : сб. ст. Ростов-на-Дону: Изд-во Южного федерал. ун-та, 2015. Т. 1: III Всерос. конф. «Экология. Экономика. Информатика. Системный анализ и моделирование экономических и экологических систем (САМЭС-2015)». С. 292-299.
4. Ваганова Н.А., Филимонов М.Ю. Прогнозирование изменений в вечной мерзлоте и оптимизация эксплуатации инженерных систем // Сибирский журнал чистой и прикладной математики. – 2013. Т. 13. № 4. – С. 37-42.
5. Filimonov M., Vaganova N. 2014. Prediction of changes in permafrost as a result technogenic effects and climate. Academic Journal of Science. 3(1): 121-128.
6. Ваганова Н.А., Филимонов М.Ю. Долгосрочное прогнозирование динамики зон оттаивания многолетнемерзлых пород в устье куста добывающих скважин // Труды Всероссийской конференции «XXXI Сибирский теплофизический семинар», посвященной 100-летию академика С.С. Кутателадзе. 17-19 ноября 2014 г. Новосибирск. ISBN 978-5-89017-039-2. С. 42-48.

7. Берсенев А.Ю., Ваганова Н.А., Васёв П.А., Игумнов А.С., Филимонов М.Ю. Кластерные вычисления как сервис на примере задачи моделирования тепловых полей от скважин на северных нефтегазовых месторождениях // Труды Международной конференции. "Научный сервис в сети Интернет: многообразие суперкомпьютерных миров". 2014. С. 147-151.
8. Filimonov, M.Yu., Vaganova N.A. Simulation of Technogenic and Climatic Influences in Permafrost // Lect. Notes Comput. Sci. 2015. Vol. 9045. P. 178-185. [DOI 10.1007/978-3-319-20239-6_18](https://doi.org/10.1007/978-3-319-20239-6_18)
9. N.A. Vaganova, M.Yu. Filimonov. Parallel Splitting and Decomposition Method for Computations of Heat Distribution in Permafrost // CEUR Workshop Proceedings 2015. Vol-1513. P. 42-49.
10. N.A.Vaganova, M Yu. Filimonov. Computer simulation of nonstationary thermal fields in design and operation of northern oil and gas fields. // AIP Conf. Proc. 1690, 020016 (2015); <http://dx.doi.org/10.1063/1.4936694>
11. М.Ю. Филимонов, Н.А. Ваганова, В.В. Гусарова. Разработка математических моделей и программного обеспечения для описания природных и техногенных процессов в грунте при кустовом способе добычи углеводородов на северных нефтегазовых месторождениях // XI Всероссийский съезд по фундаментальным проблемам теоретической и прикладной механики: сборник трудов (Казань, 20 – 24 августа 2015 г.). С. 3916-3918.
12. M. Filimonov, N. Vaganova. Short and Long Scale Regimes of Horizontal Flare System Exploitation in Permafrost // CEUR Workshop Proceedings. Volume 1662, 2016, P. 253-260.
13. M.Yu. Filimonov, N.A.Vaganova. Simulation of permafrost changes due to technogenic influences of different engineering constructions used in northern oil and gas fields // Journal of Physics: Conference Series 754 (2016) 112004. [doi:10.1088/1742-6596/754/11/112004](https://doi.org/10.1088/1742-6596/754/11/112004)
14. N.A.Vaganova, M.Yu. Filimonov. Different shapes of constructions and their effects on permafrost // AIP Conf. Proc. 2016. NY:AIP Publishing LLC. Vol. 1789, iss.1. 020020. [doi 10.1063/1.4968441](https://doi.org/10.1063/1.4968441)
15. Filimonov M., Vaganova N. Numerical Simulation of Technogenic and Climatic Influence on Permafrost // Advances in Environmental Research. 2017. Volume 54. Chapter 5. NY: Nova Science Publishers. P. 117-142.

План доклада

1. История возникновения задач.
2. Математическая модель и метод решения.
3. Сравнение с экспериментальными данными.
4. Моделирование различных технических систем, функционирующих на северных нефтегазовых месторождениях. Численные расчеты.
5. Выводы.

Схема добычи нефти в обычных условиях и в зонах распространения вечной мерзлоты



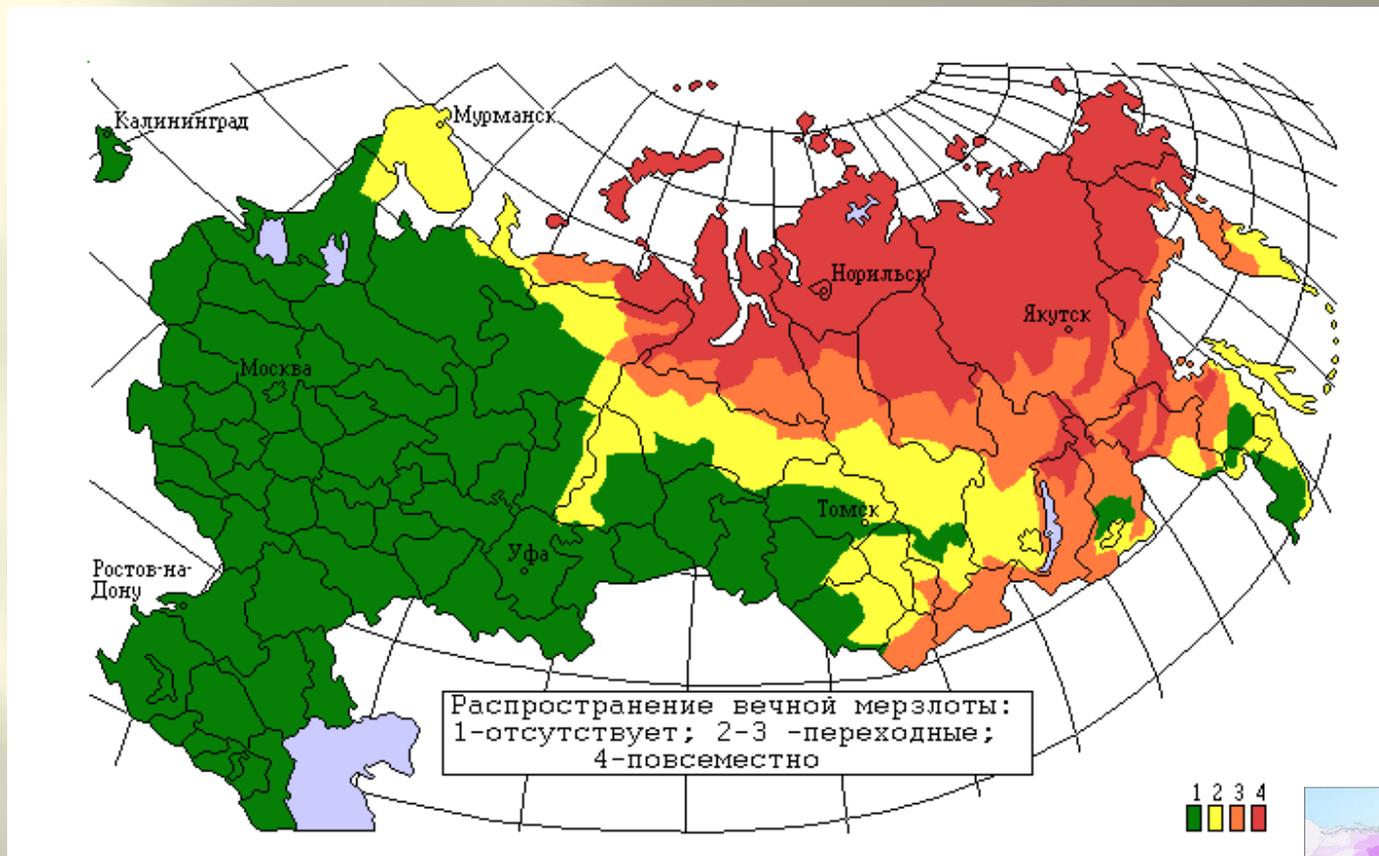
Определение. Многолетнемерзлыми породами (ММП) называются породы, сохраняющие отрицательную температуру, не менее 2-х лет



М.В. Ломоносов в работе

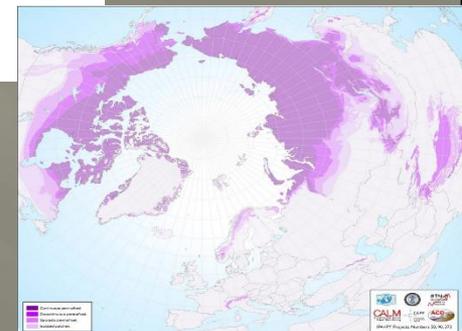
"Слово о рождении металлов от трясения земли"(1757) объяснил существование **«земли, замерзшей даже летом на глубине ниже тонкого талого слоя в местах, близких Северным морям и в высоких горах, отделяющих Сибирь от Китайской империи»** суровостью климата и близостью к **«холодным атмосферным слоям»**. 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** – около **60%**, в Канаде - **50%**.

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



Природные явления в зонах распространения вечной мерзлоты



Природная воронка была обнаружена в Ямало-Ненецком автономном округе, ее глубина составляет около 16,5 метров. Полагают, что воронка образовалась в результате подземного взрыва газовых гидратов.



- ▣ Проблема уменьшения интенсивности теплового взаимодействия в системе «скважина(источник тепла) – порода» имеет особое значение для решения задач энергосбережения, охраны окружающей среды, безопасности, экономии затрат и повышению эксплуатационной надежности скважин.
- ▣ По данным доклада комиссии экологического надзора, в России до **2 млрд \$ США в год** тратится на ремонт инфраструктуры и трубопроводов, поврежденных в результате изменений в вечной мерзлоте.



Обрушившаяся в результате ослабления фундамента секция здания в поселке Черский.



Деформация
опор,
трубопроводов,
рельсов



Tok Cutoff Highway



Обустройство кустовых площадок в зоне ММП



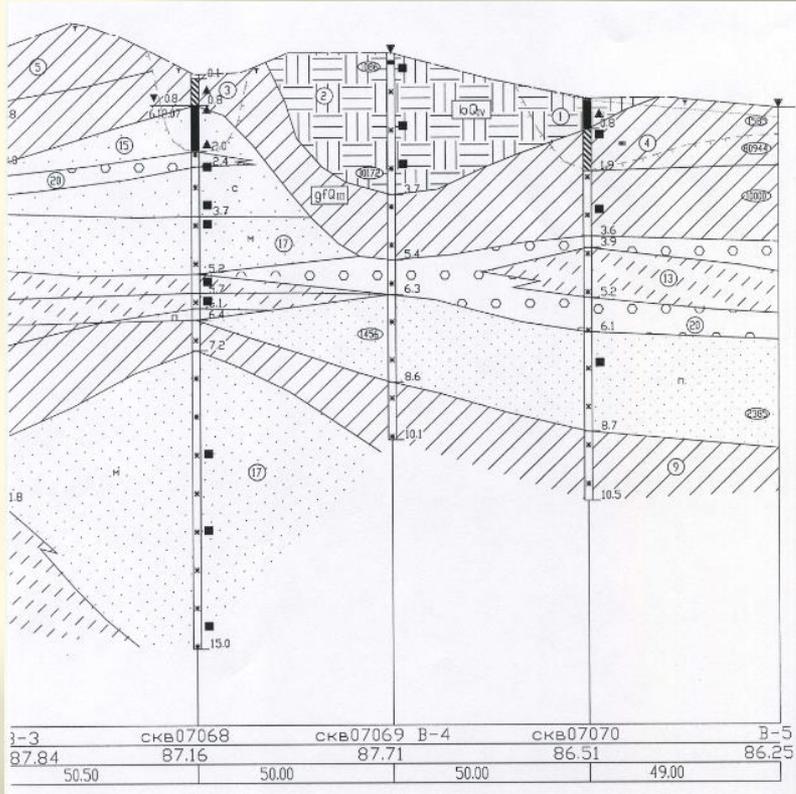
В криолитозоне России добывается около **93% российского природного газа и 75% нефти**, (до **70%** экспорта страны).

Эксперты оценивают начальные извлекаемые запасы в Арктической части России в **7.6 млрд. тонн нефти и 66.9 трлн кубометров газа (258 млрд. тонн условного топлива)**.

Толщина **многолетнемерзлых пород (ММП)** в этих зонах **от 10 до 800 м**.

- ▣ Ввод каждой новой разведочной скважины обходится примерно в **0.5 млрд. рублей**.
- ▣ Добыча нефти в Арктике становится рентабельной при цене нефти **70-100 \$ за барель**.

ЭТАПЫ ОБУСТРОЙСТВА КУСТОВОЙ ПЛОЩАДКИ

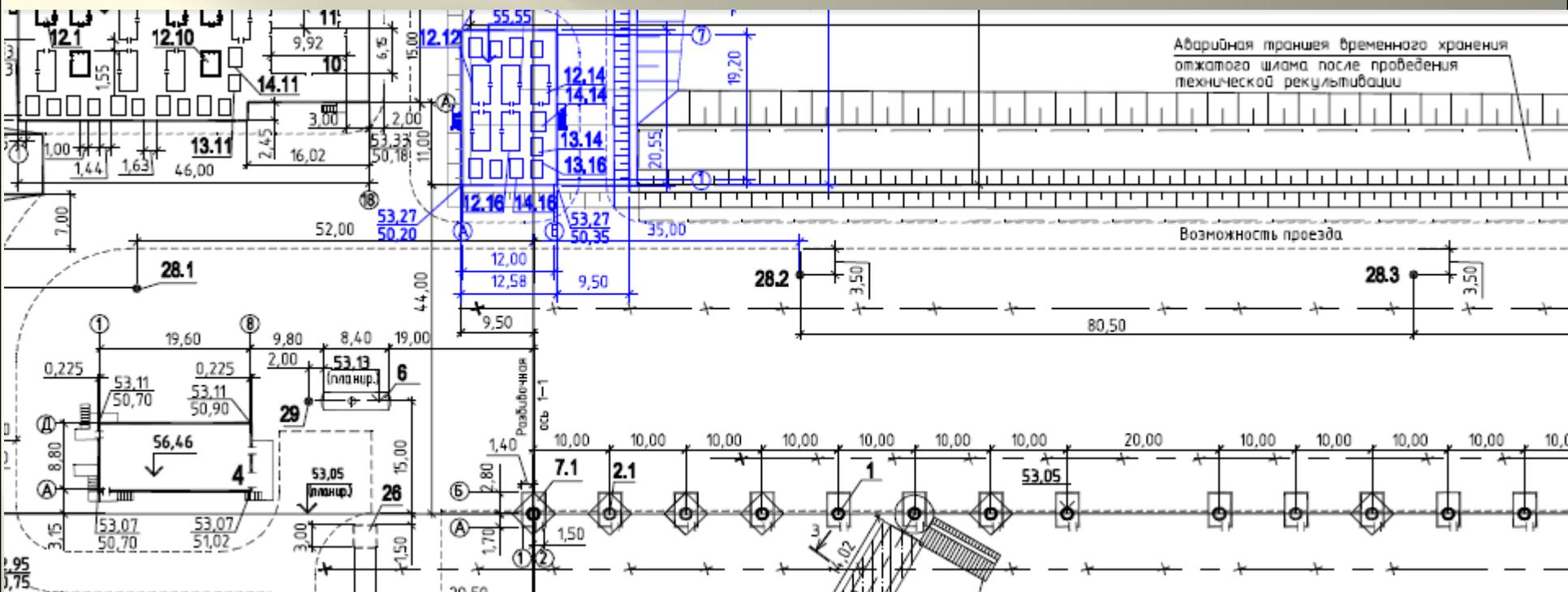


По результатам инженерно-геологических изысканий строится трехмерная модель разреза, для которой проводится 3D моделирование растепления.

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 ³		Примечание
	Насыпи (+)	Выемки (-)	
1. Грунт вертикальной планировки дополнительной площадки под энергетическое оборудование / площадки стоянки 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 безводное насыпи с включением мерзлых комьев, k=0,03	135	-	
7. Подработка на потери грунта при транспортировке k=0,01	47	-	
8. Песок для абразийного зала	114	-	
Всего пригодного грунта	4768	-	
9. Недостаток пригодного грунта (из карьера)	-	4768	
Итого перерабатываемого грунта	4768	4768	

Экспликация зданий и сооружений

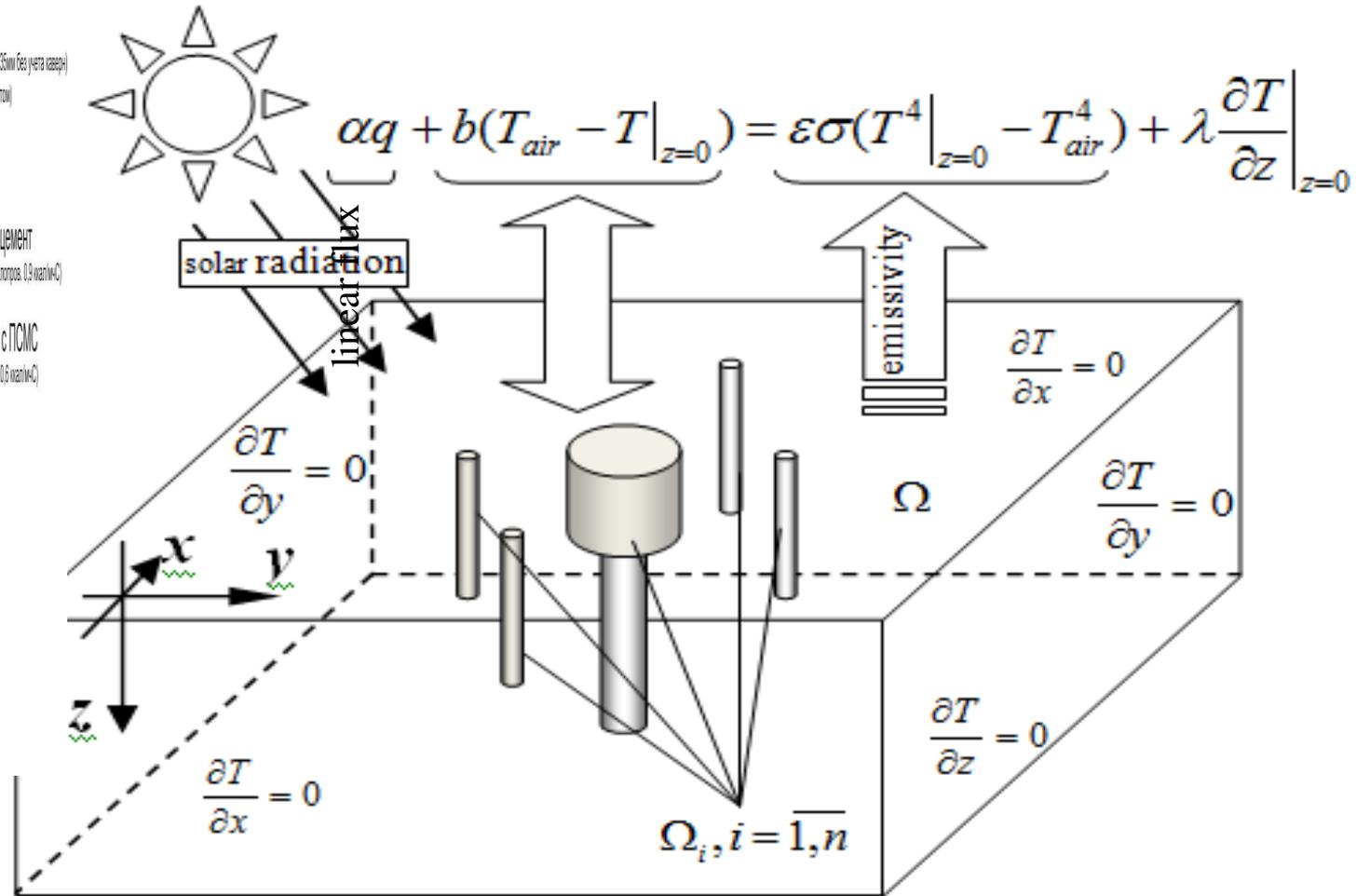
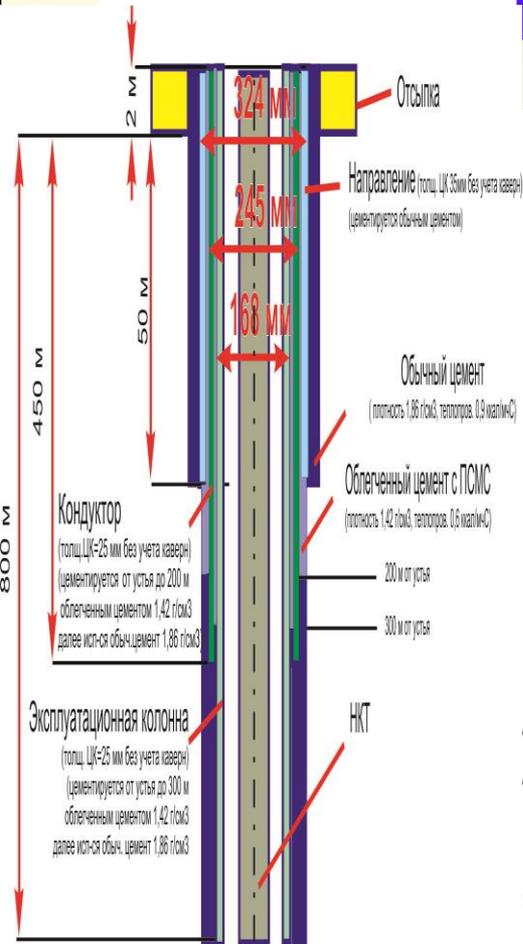
Номер по плану	Наименование	Координаты квадрата сетки
1	Устье добывающей скважины.	
2.1	Устье добывающей скважины (ЗЦН) с возможным переходом на водоагнетание	
3	Устье газонагнетательной скважины	
4	Блок технологический	
5	Блок дозирования метанола	
6	Дренажная емкость V=40м ³	
7.1-7.14	Укрытие добывающей и с ЗЦН скважины с устьевым колодезем	
7.15-7.16	Укрытие газонагнетательной 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	

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.**

2. Краевые условия на границах расчётной области



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

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

где $\rho = \rho(x, y, z)$ – плотность [кг/м³],

$T^* = T^*(x, y, z)$ – 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,

δ – дельта-
функция Дирака.

Граничные условия

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

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

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

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.

Нелинейное краевое условие на дневной поверхности

Солнечная радиация αq . Эта величина зависит от состояния атмосферы, угла падения солнечных лучей, т.е. широты местности и времени суток, α - доля энергии, ушедшая на нагрев грунта $q_1 = \alpha q$.

Теплообмен с воздухом. Если температура прилегающего к дневной поверхности воздуха равна T_{air} , а температура самой поверхности - $T_{z=0}$, то $q_2 = b(T_{air} - T_{z=0})$, где b - коэффициент теплообмена, зависящий от характера и типа дневной поверхности.

Излучение «черного тела».

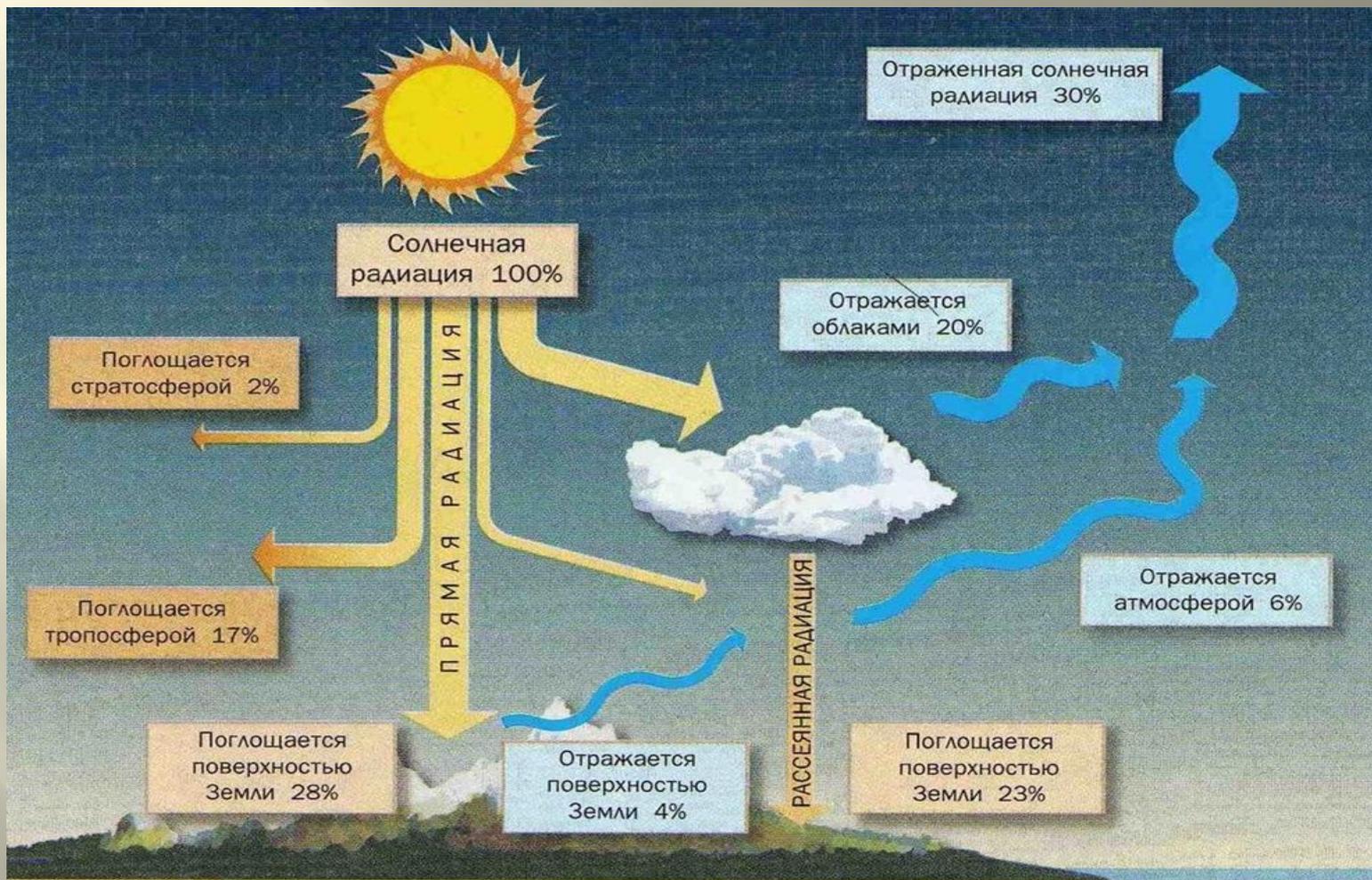
$$q_3 = \varepsilon \sigma (T^4 - T_{air}^4)$$

Теплоотдача за счет внутреннего теплового потока.

$q_4 = -\lambda \partial T / \partial z$, λ - коэффициент теплопроводности грунта, образующего дневную поверхность.

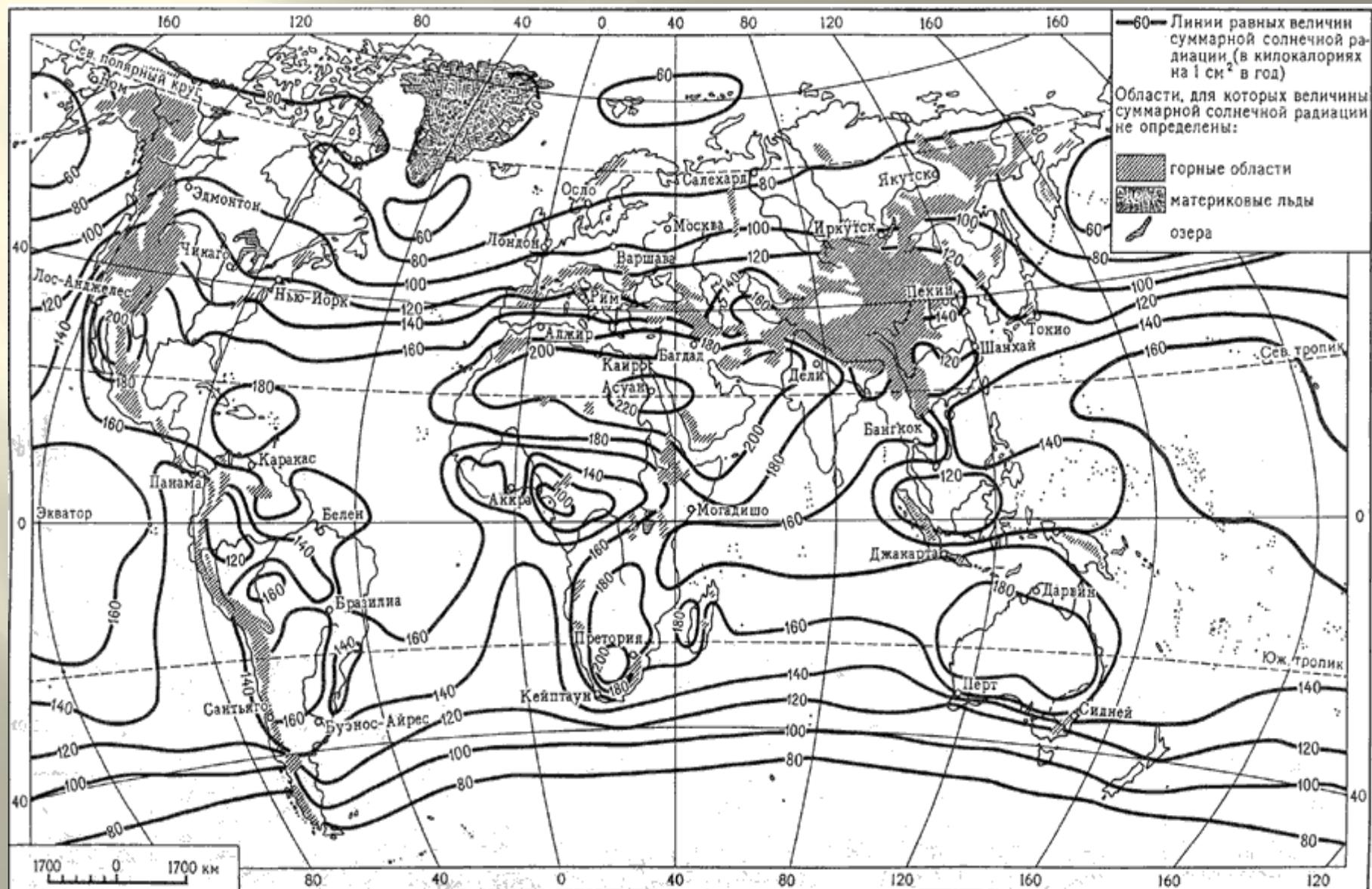
Баланс потоков $q_1 + q_2 = q_3 + q_4$ и дает краевое условие (3)

Распределение солнечной радиации между Землей и атмосферой



Распределение солнечной радиации между Землей и атмосферой

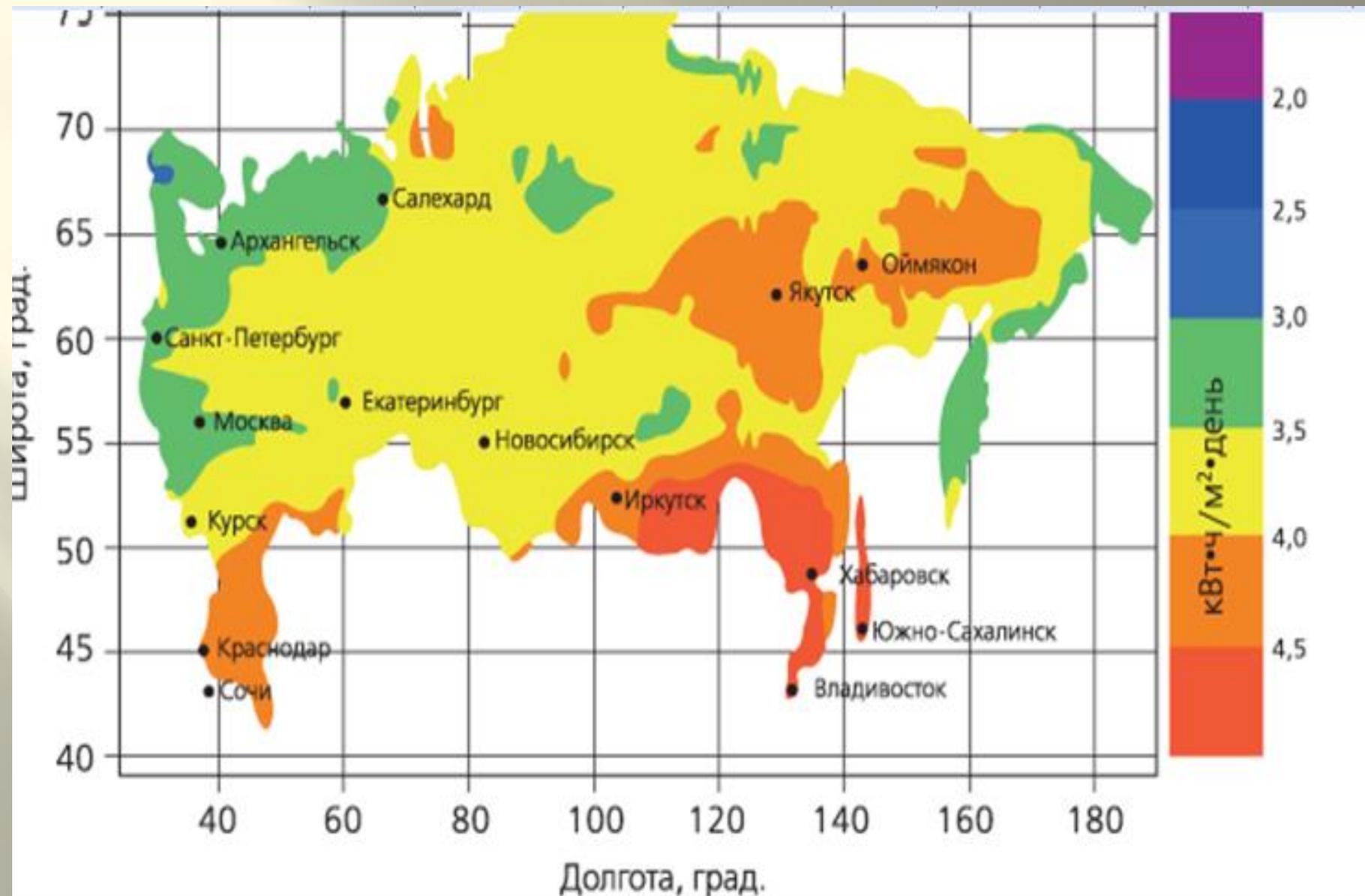
Суммарная солнечная радиация за год



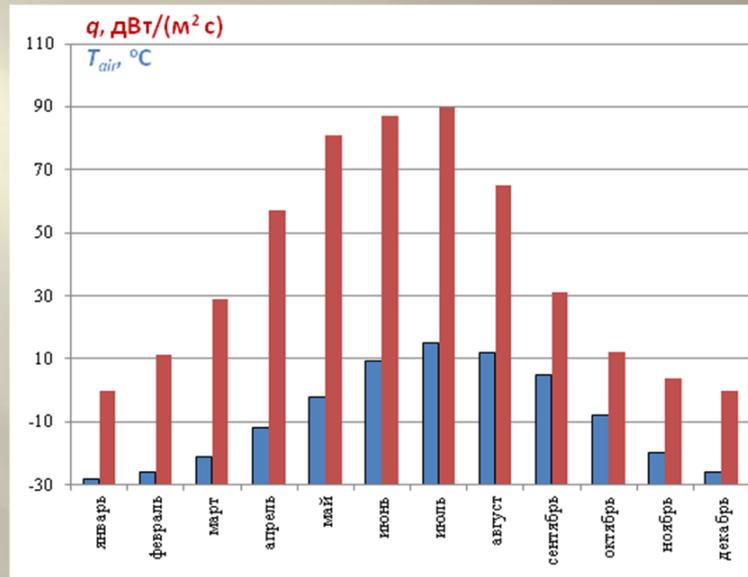
Количество лучистой энергии Солнца, поступающей за 1 мин на площадку в 1 см², поставленную вне земной атмосферы перпендикулярно к солнечным лучам на среднем расстоянии Земли от Солнца, называется солнечной постоянной; она равна 1,95 кал/(см²×мин), что соответствует потоку в 1,36×10⁶эрг/(см²×сек).



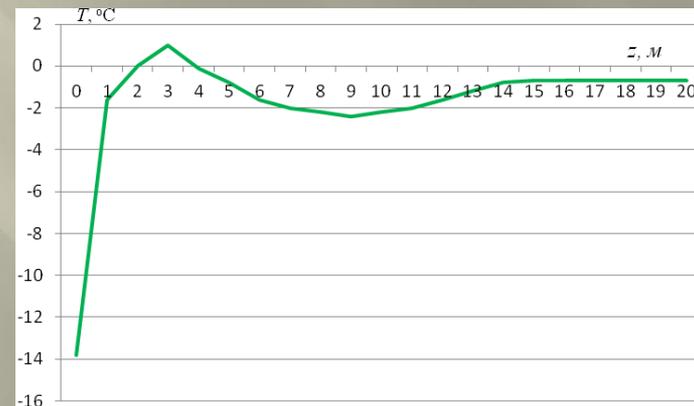
Карта суммарной солнечной радиации в России



Исходные климатические данные



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



Распределение температуры в грунте в зависимости от глубины

ЦЕЛЬ ИССЛЕДОВАНИЙ –

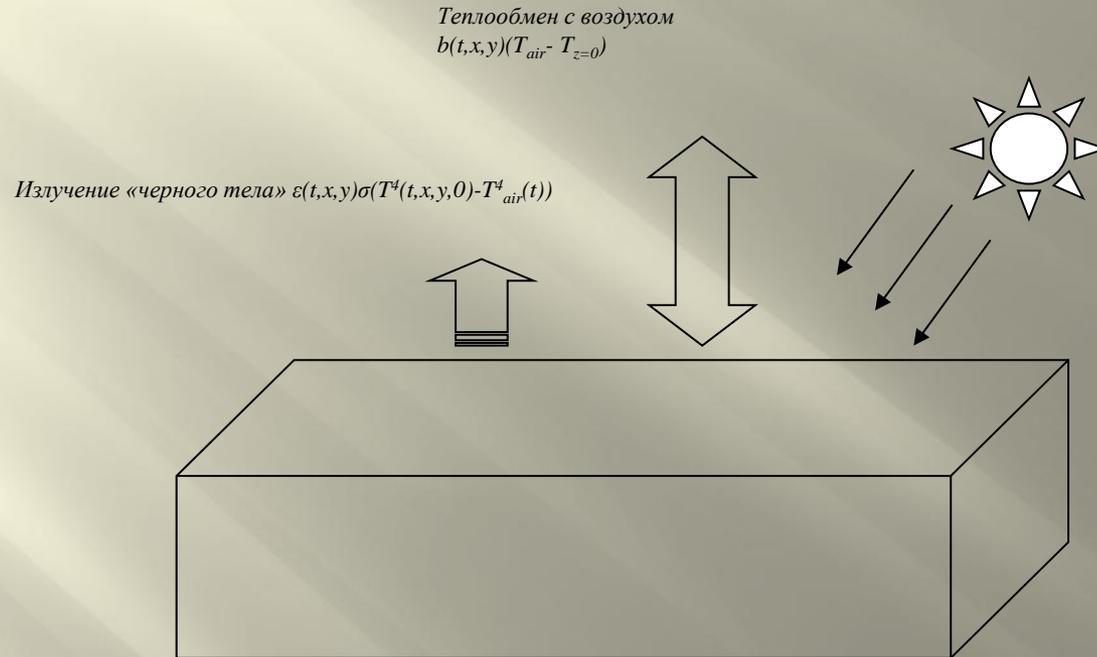
моделирование сложных технических систем и расчет нормативных данных для оптимального проектирования кустовых площадок и уменьшения теплового влияния инженерных систем на ММП

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.

«Привязка» алгоритма к конкретным географическим координатам



ВЫБОР ПАРАМЕТРОВ, ВХОДЯЩИХ В КРАЕВОЕ УСЛОВИЕ (3)

На основании решения задачи (1)-(3) должно получались следующие соотношения:

$$T(0)(t_0, x_0, y_0, z) \approx T(t_0 + 365j, x_0, y_0, z), \text{ где } j=1, 2, \dots, J. \quad (4)$$

Т.е. решение задачи (1)-(3) периодически повторяло (в соответствии с годовым температурным циклом) с некоторым приближением заданное начальное распределение $T(0)(t_0, x_0, y_0, z)$. И чем точнее выполняется данное соотношение на большем промежутке времени (для большего значения J), тем точнее удаётся выбрать параметры, входящие в условие (3). Для решения данной оптимизационной задачи разработан специальный итерационный алгоритм. В случае если известно только значение температуры ММП (T_p) ниже слоя сезонного протаивания грунта (желательно на глубине, как показали наши расчёты по исследованию закономерностей промерзания грунта, не менее 10 метров), то можно ограничиться получением асимптотики распределения температуры при решении задачи (1)-(3), т.е. получения асимптотики

$$T \rightarrow T_p, \text{ при } z > 10 \text{ метров.}$$

(5)

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

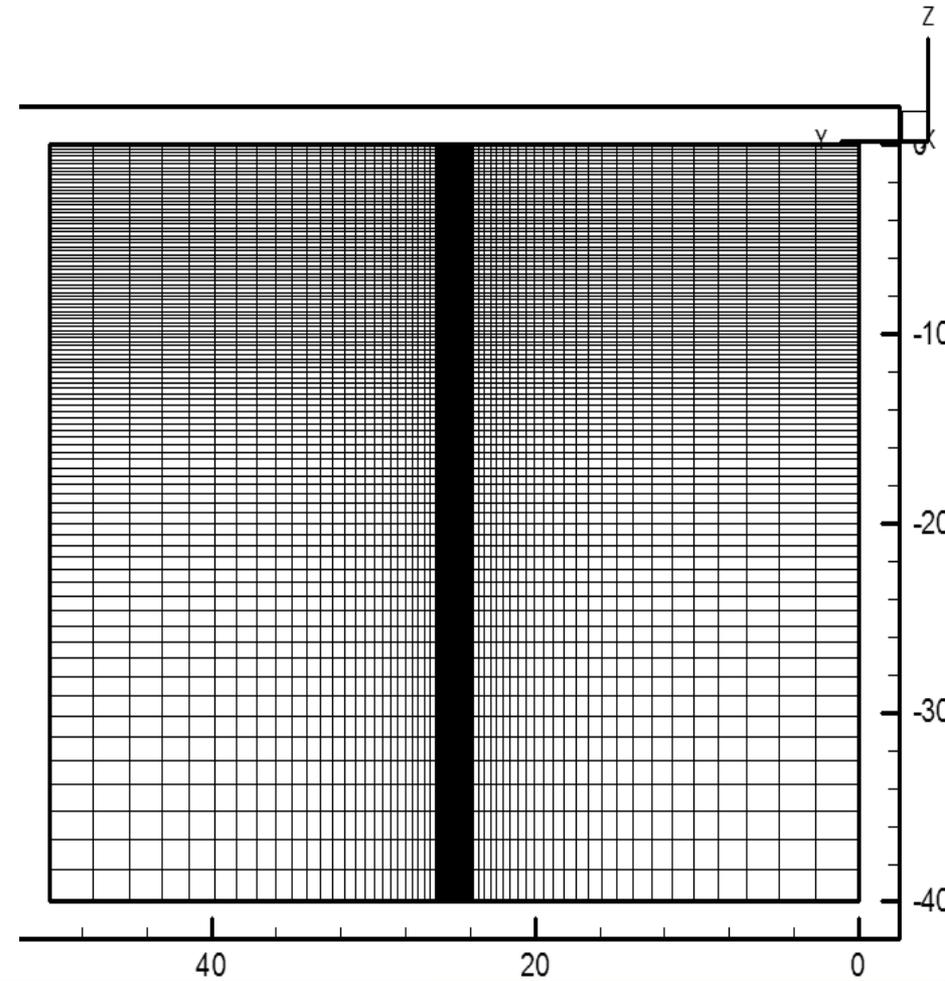
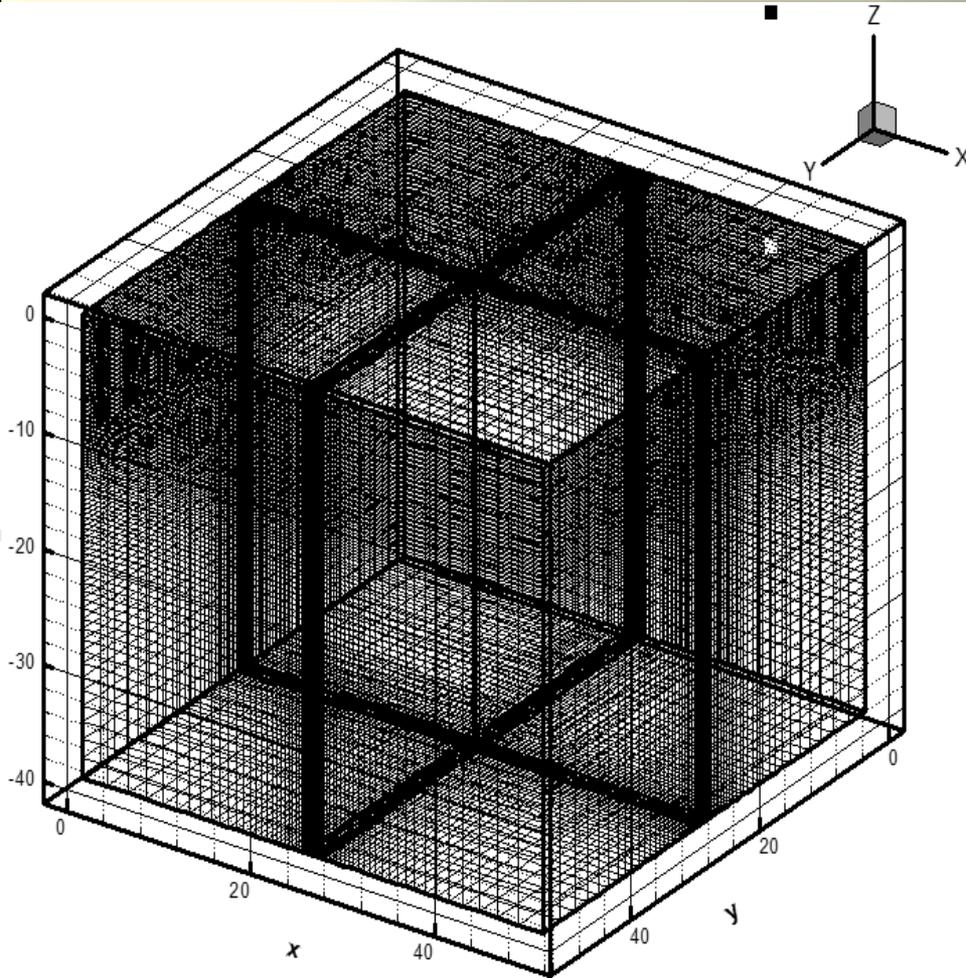
С использованием этого подхода, в работе

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 **δ -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.**

Разработан комплекс программ Wellfrost

(свидетельство о гос. регистрации программы для ЭВМ

№ 2012660988 от 4 декабря 2012г.)

(авторы - Ваганова Н.А., Филимонов М.Ю.)

Точность численных расчетов – 5% (сравнение с экспериментальными данными на месторождении «Русское»)

В программе учтены следующие параметры:

- ▣ *сезонные колебания температур воздуха,*
- ▣ *возможный фазовый переход,*
- ▣ *инженерные сооружения, которыми оснащены добывающие скважины (различные теплоизолирующие материалы), теплоизоляция поверхности рабочей площадки, на которой бурятся скважины (как правило, это бетонные плиты, песок и пеноплекс),*
- ▣ *различные теплофизические параметры и литология грунта (не только в вертикальной плоскости),*
- ▣ *различные технические системы кустовой площадки (охлаждающие устройства, факельные системы и т.п.),*
- ▣ *начальная стадия проведения бурильных работ (до двух недель), когда происходит прохождения верхнего слоя мерзлого грунта бурильным инструментом, влияющим на растепление **ММП**.*

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

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

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

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

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

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

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

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

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

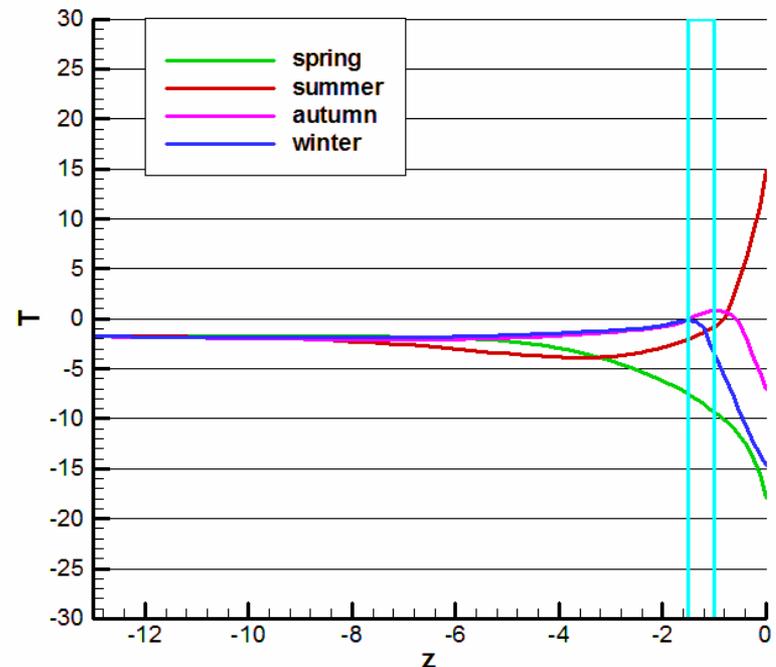
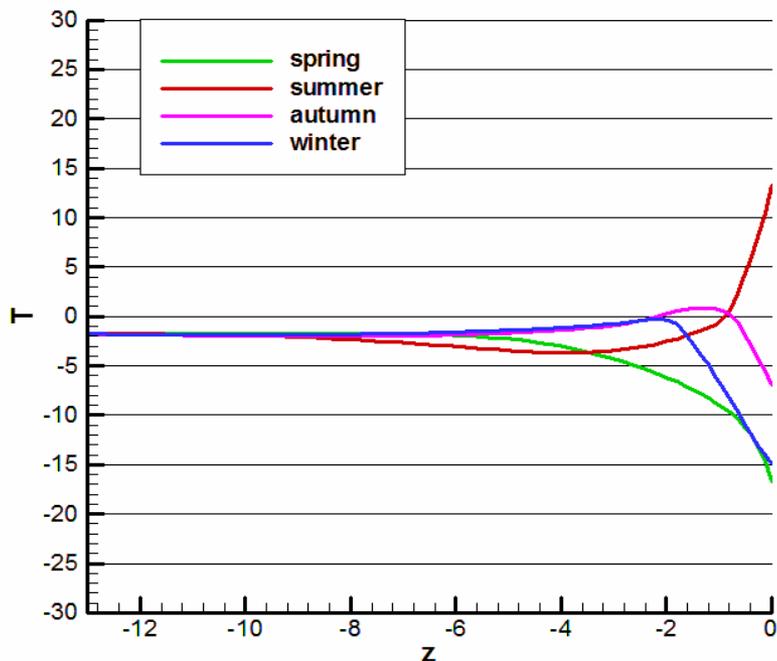
на расстоянии 4.4 м от скважины 2Г.

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.

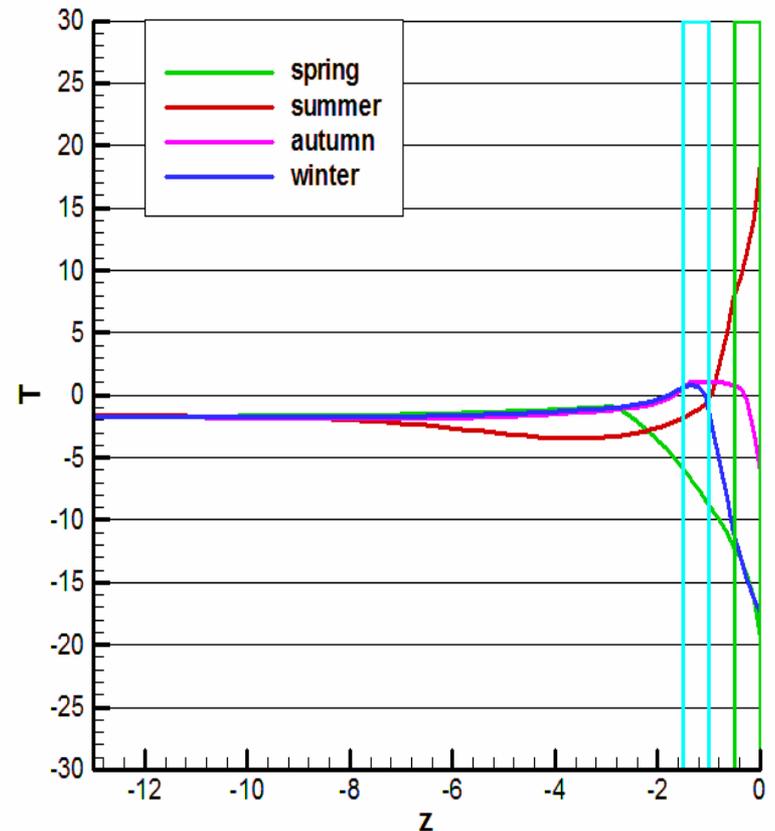
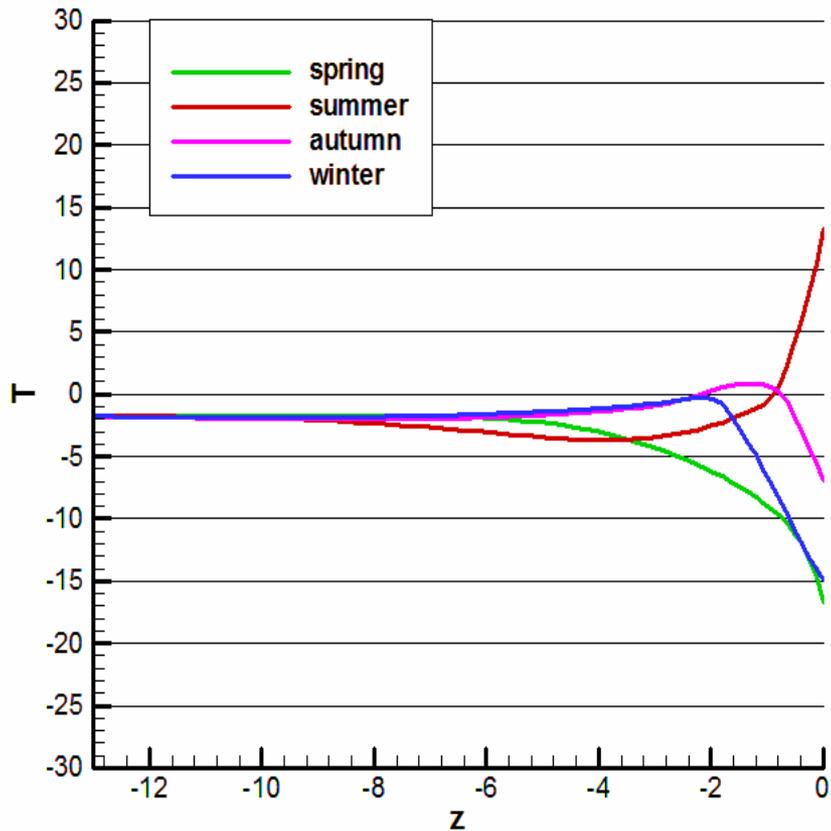
4. ЧИСЛЕННЫЕ РАСЧЕТЫ

4.1. Моделирование тепловых полей в грунте

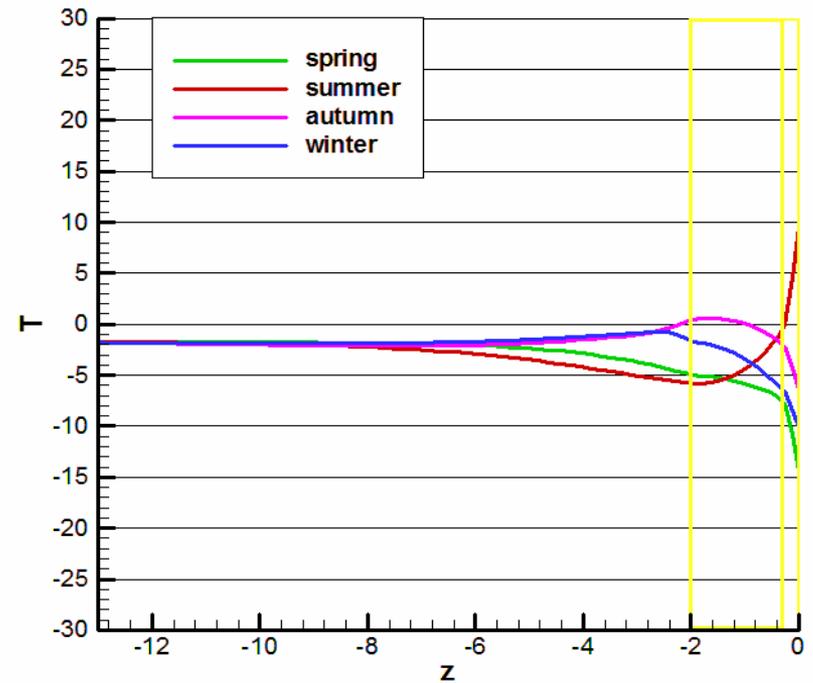
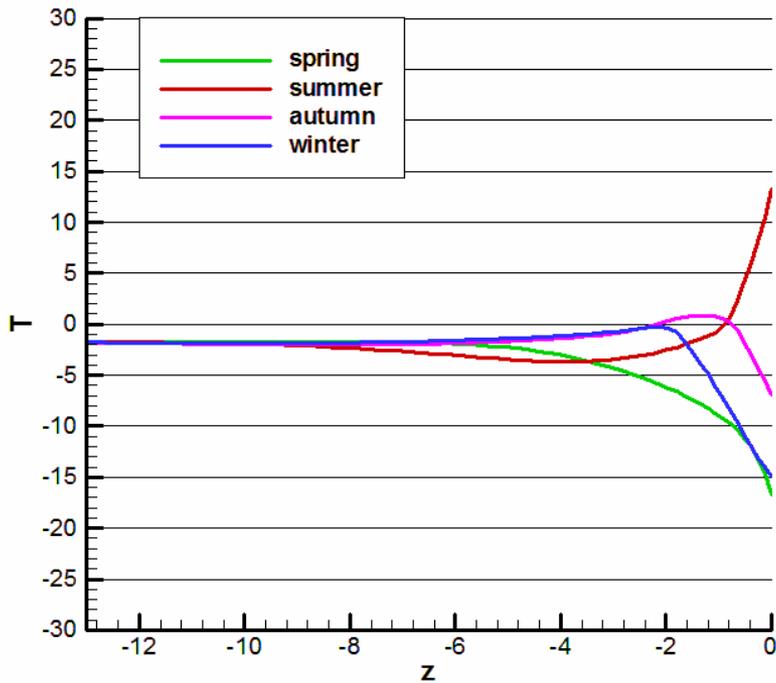
Сезонное **промерзание** и **оттаивание** грунта(слева) и грунта с «линзой» воды/льда (справа)



Сезонное промерзание и оттаивание грунта(слева) и грунта с «линзой» воды/льда и торфа(справа)



Сезонное промерзание и оттаивание грунта(слева) и грунта с отсыпкой 2м песок 1.7м+0.3м бетонная плита (справа)

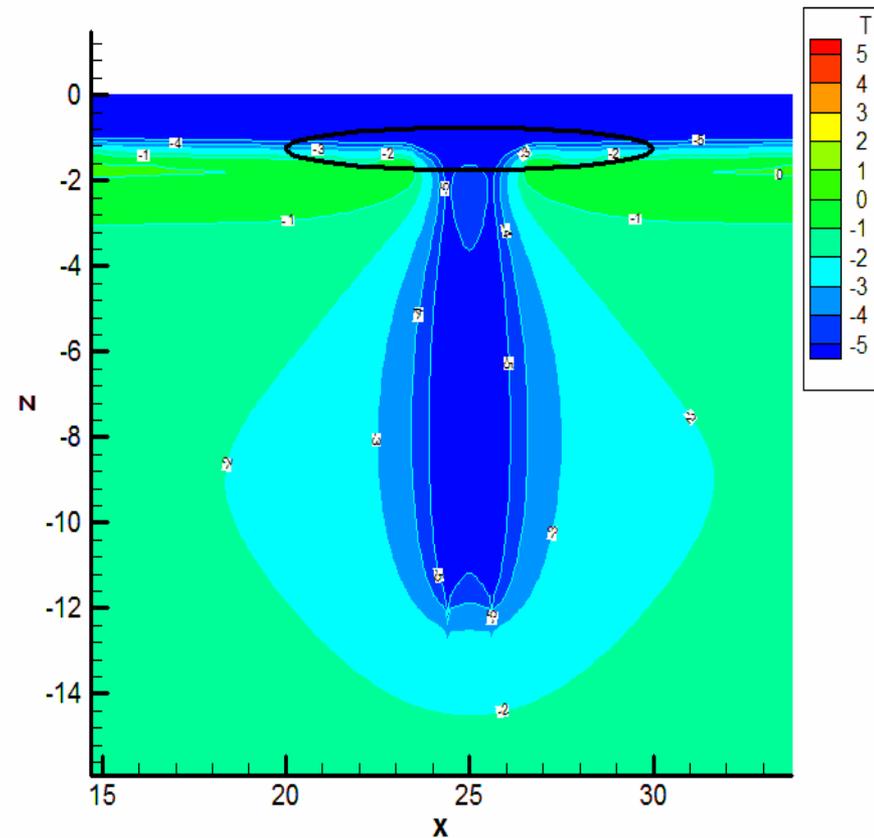
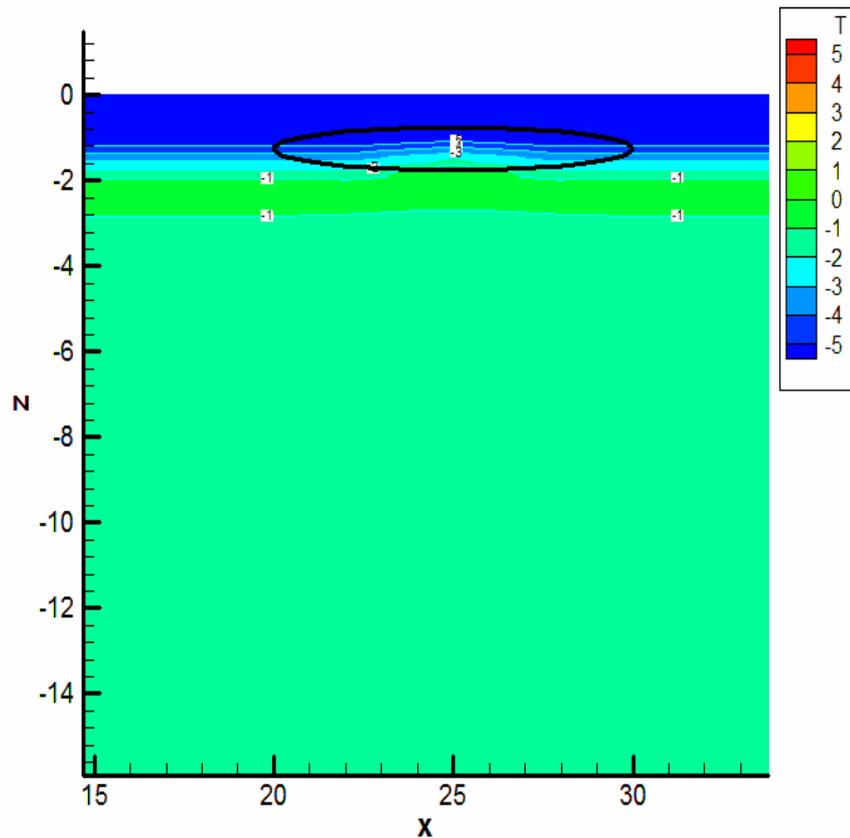


4.2. ТЕРМОСТАБИЛИЗАЦИЯ ГРУНТА

Производство СОУ(сезоннодействующих охлаждающих устройств) в г.Тюмень



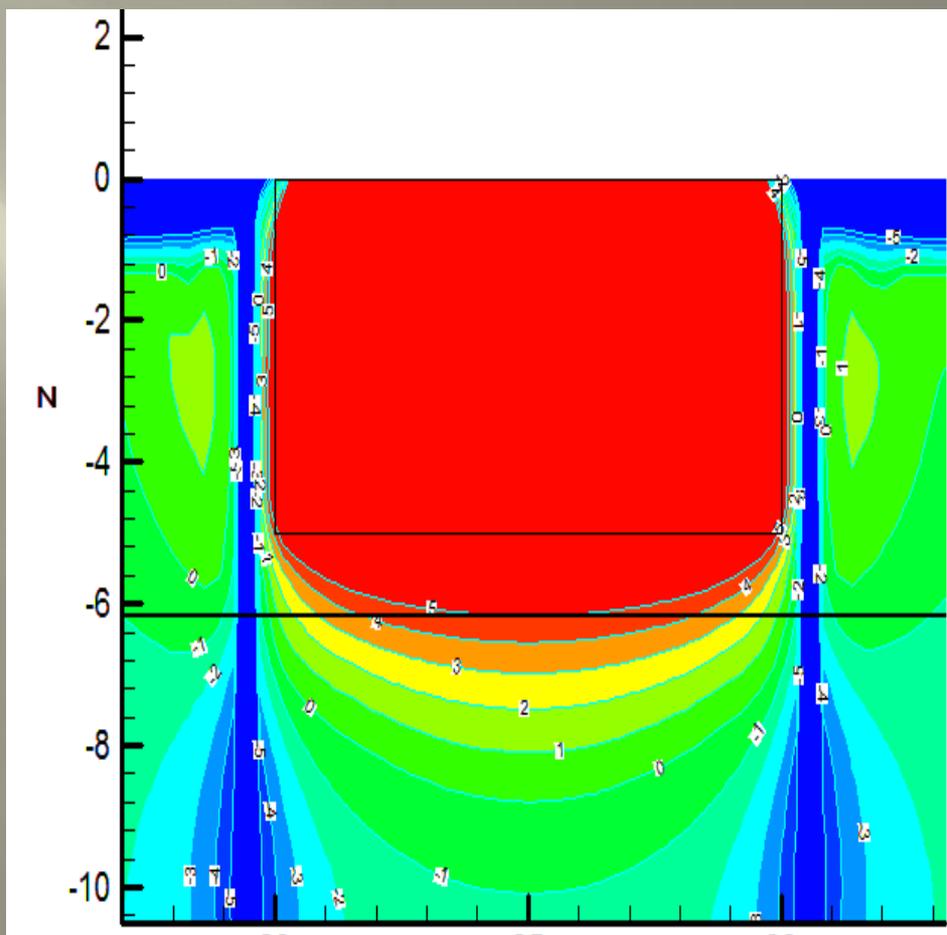
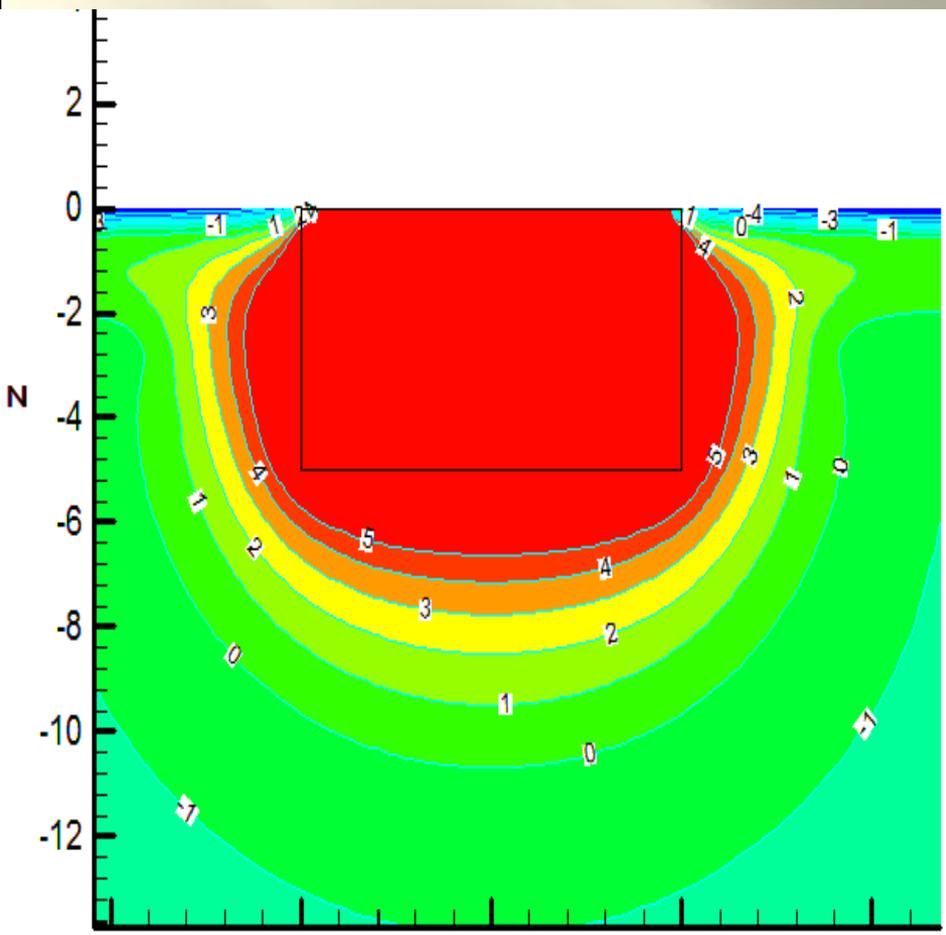
Промерзание грунта с линзой льда в январе (слева), промерзание грунта с линзой льда и 2-мя СОУ (справа)



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.

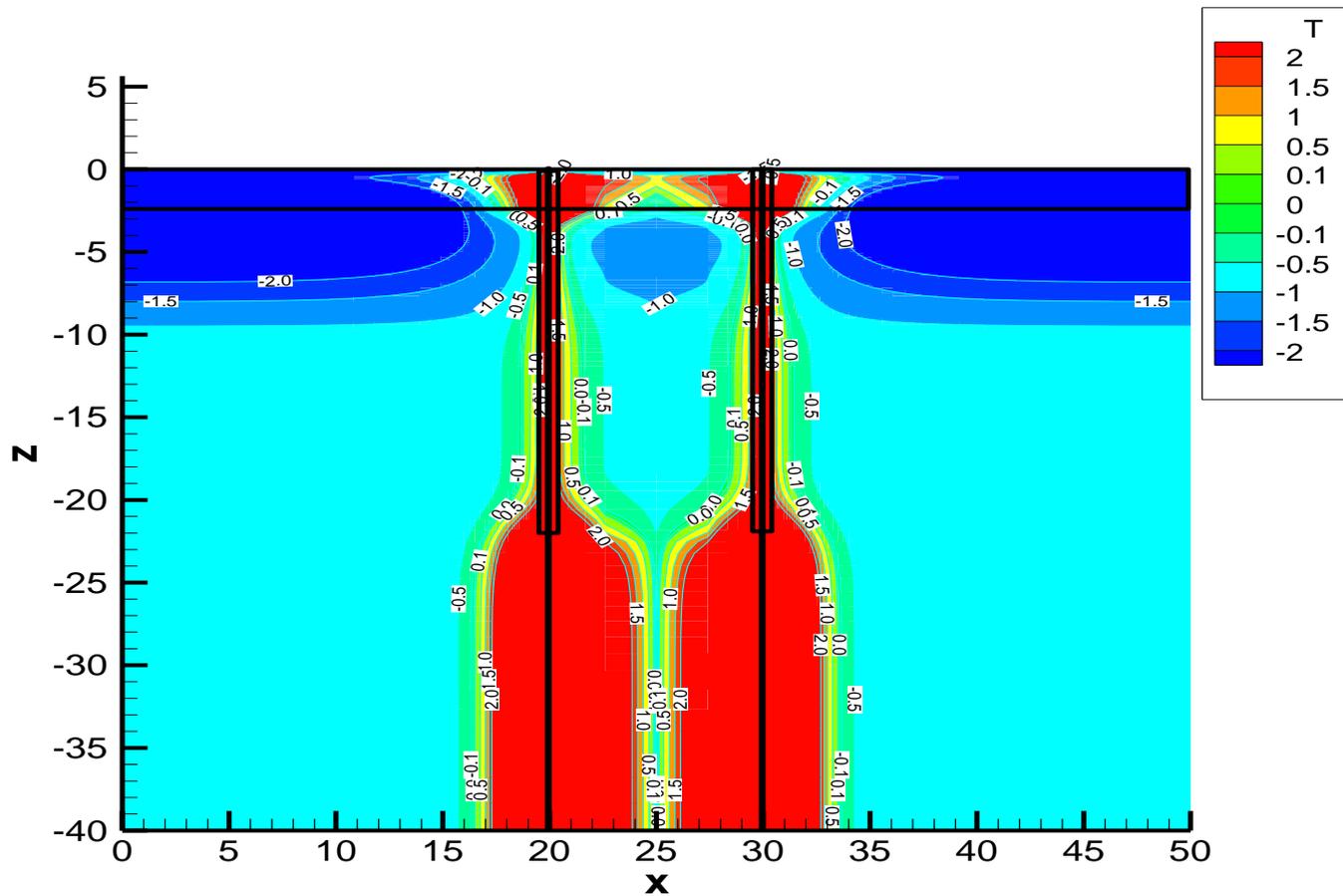


4.3. Численные расчеты (скважины)

2 скважины, $R=89$ мм.

$T_0 = -0.7^\circ\text{C}$, $T_{\text{скважины}} = 45^\circ\text{C}$,

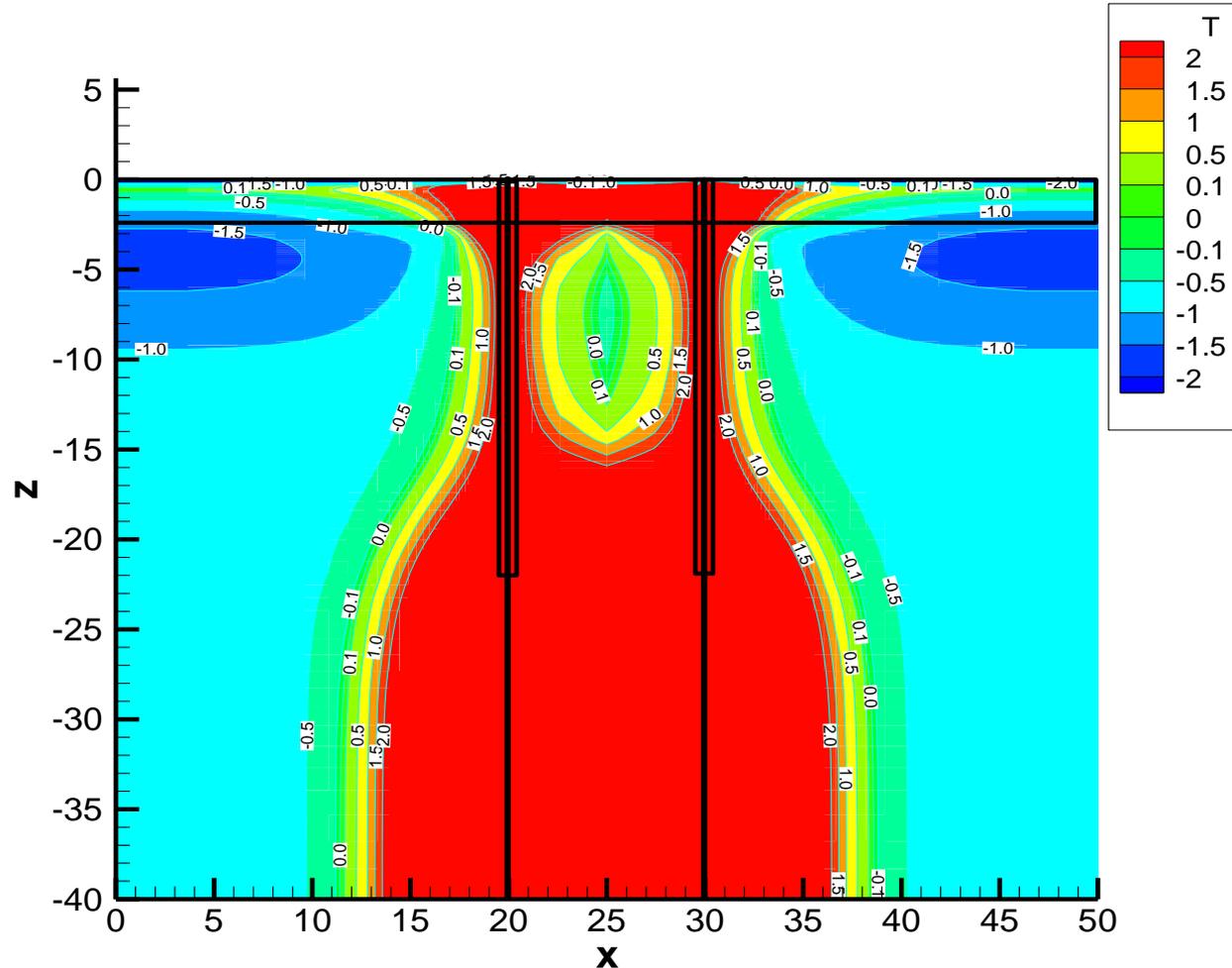
Термокейс до глубины 22 м. (Ванкорское месторождение, 1.5 года октябрь)



2 скважины, R=89 мм. T₀=-0.7С

T_{скважины}=45С,

Термокейс до глубины 22м. (Ванкорское месторождение, 9.5 лет, октябрь)



Отсыпка

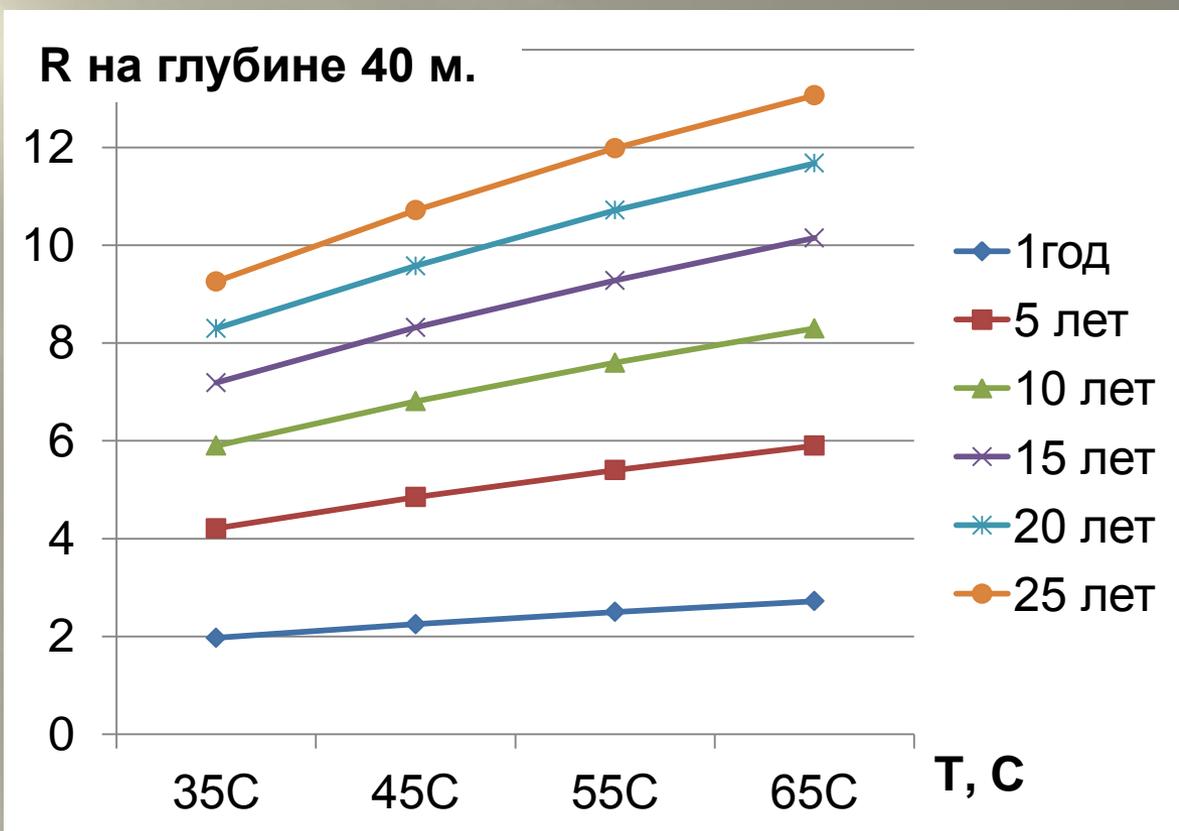
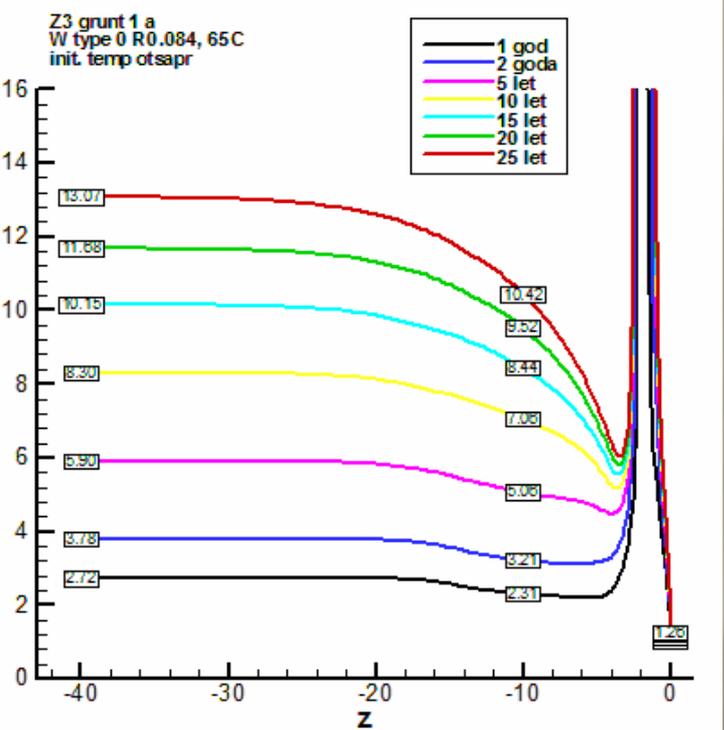
Супесь

$R_0=0.084$ м.

$R_1=0.162$ м.

$R_2=0.387$ м.

Изменение радиуса растепления в зависимости от температуры скважины.



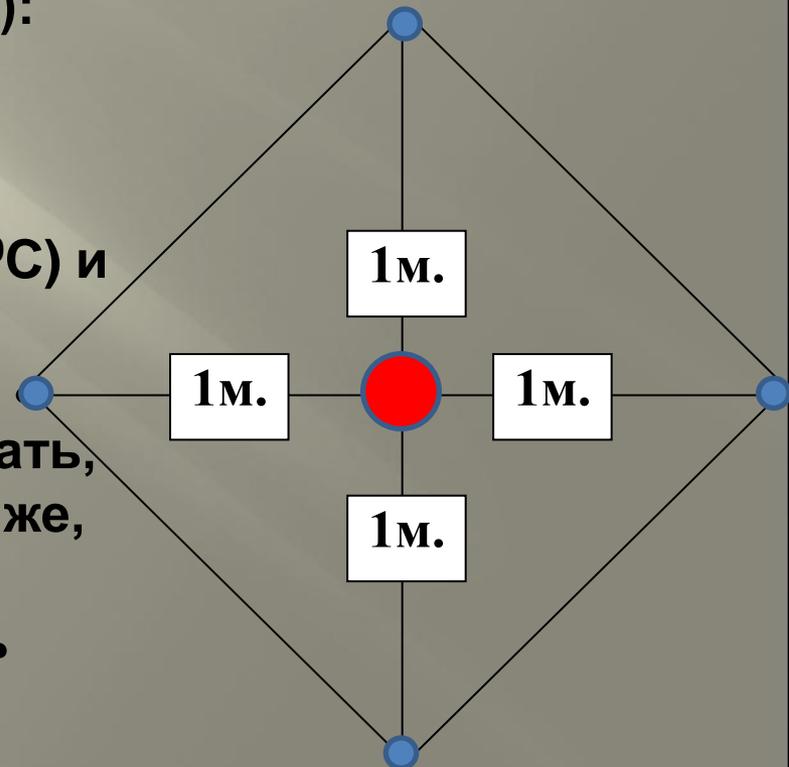
Растепление ММП от добывающей скважины При наличии нескольких СОУ

Сезонное Охлаждающее Устройство (СОУ):
диаметр 0.067 м.
глубина 12 м.

**Одна теплоизолированная скважина (+80°C) и
4 СОУ на расстоянии 1 метра («ромб»).**

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

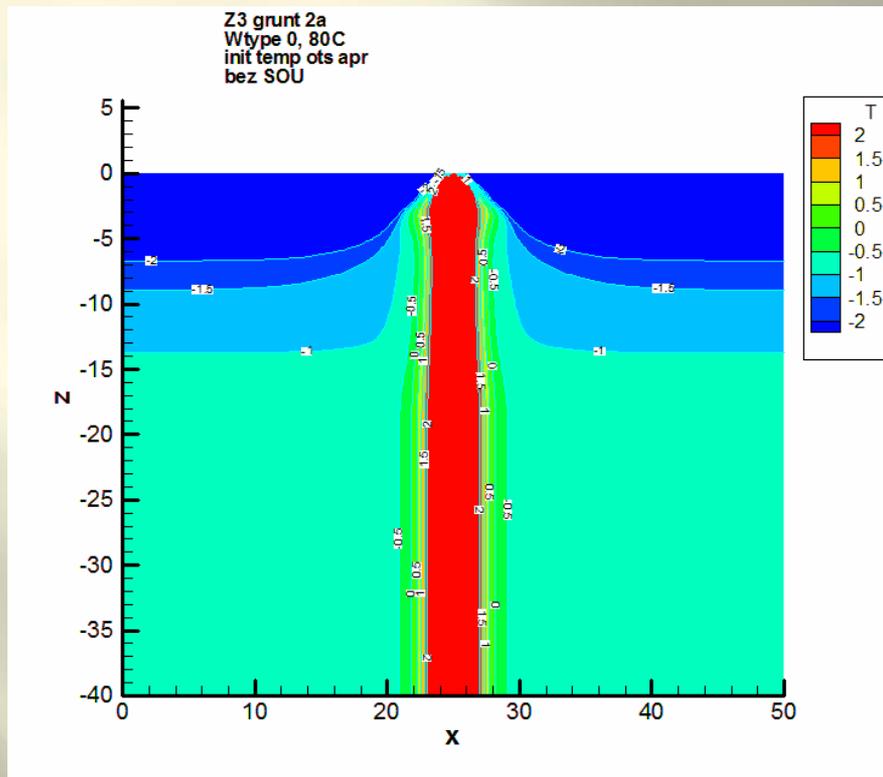
**Начало эксплуатации скважины – октябрь
месяц**



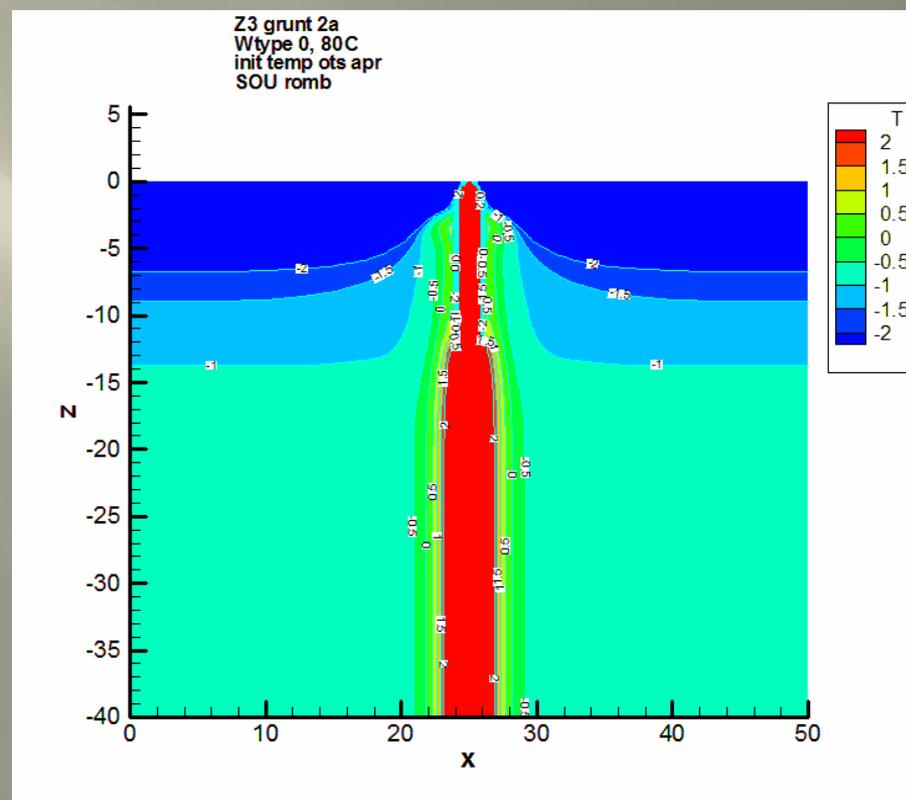
18 месяцев, апрель

(x,z)

Без СОУ

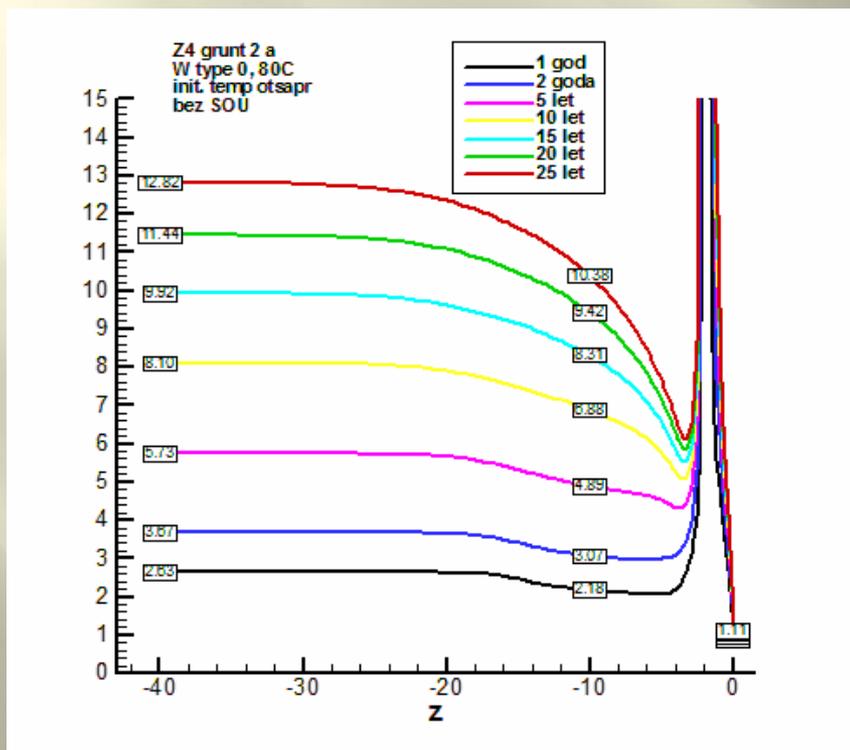


4 СОУ

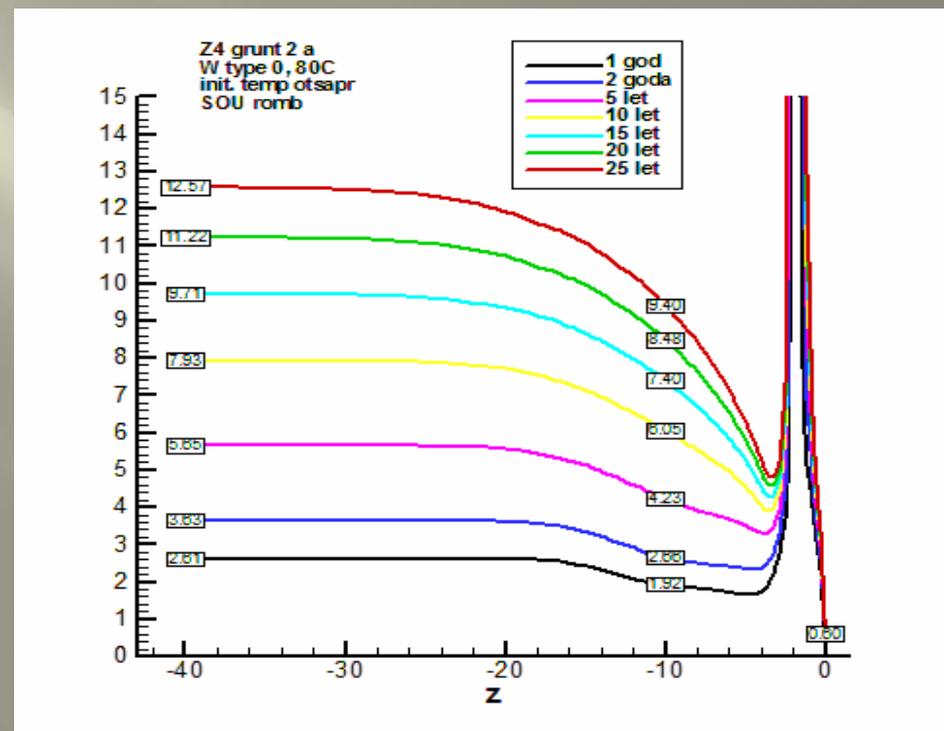


Радиус растепления.

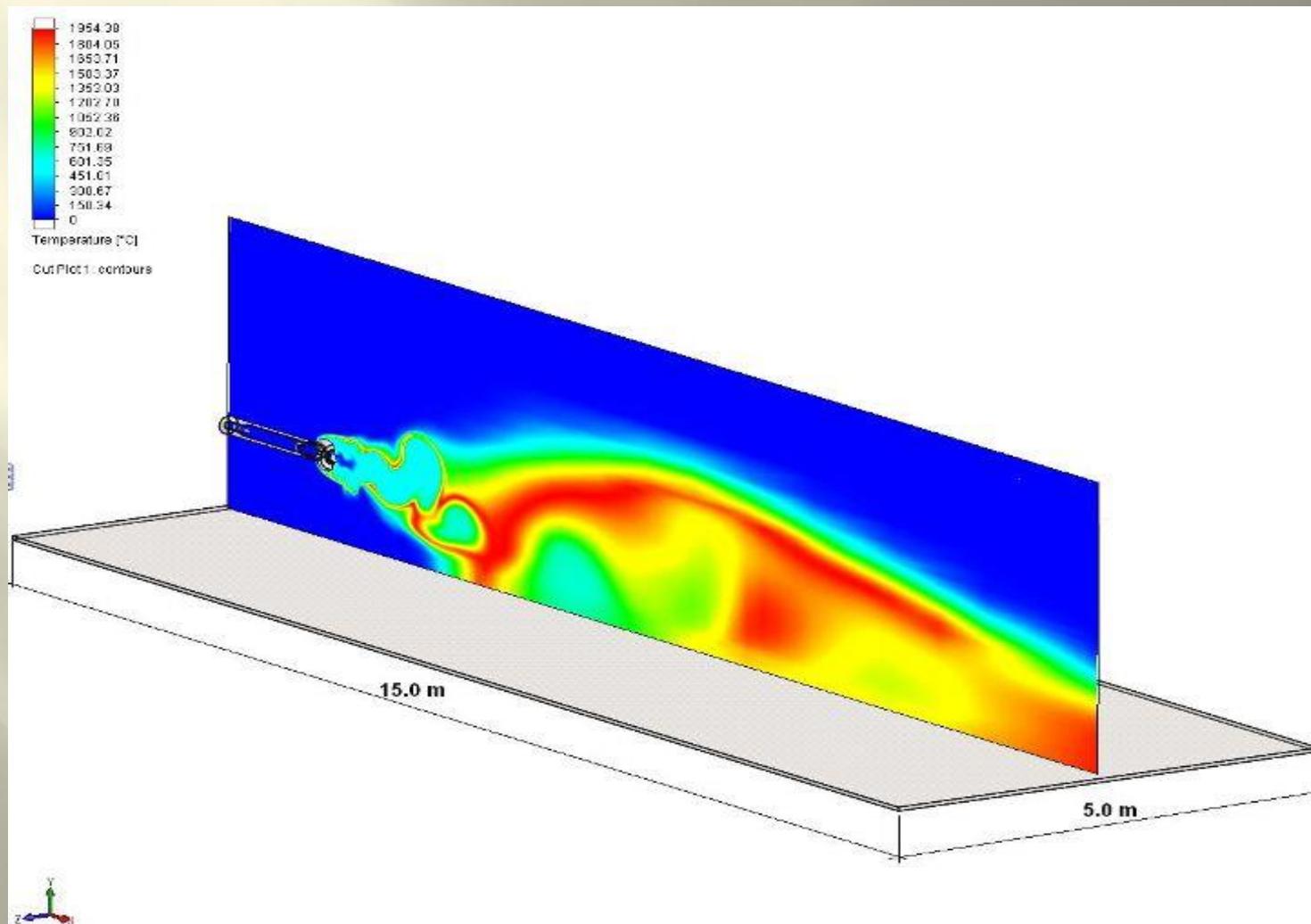
Без СОУ



4 СОУ



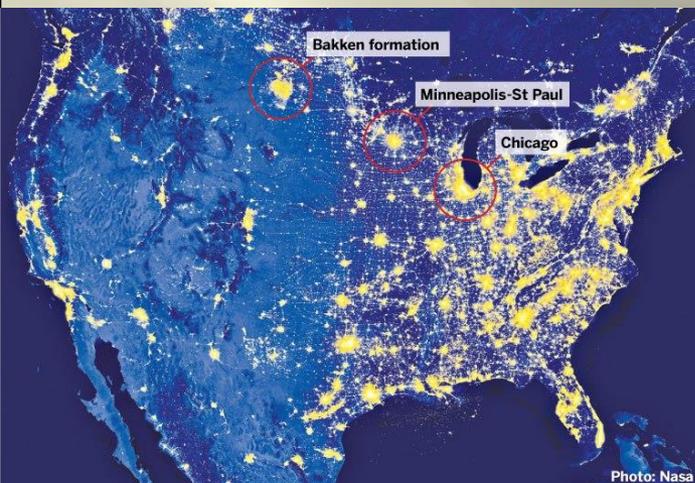
4.4. Моделирование и расчет горизонтальных факельных установок (ГФУ) для Месояхских месторождений



ВИД ЗЕМЛИ НОЧЬЮ ИЗ КОСМОСА



NASA 2013 Earth at night



Сжигание сланцевого газа в США



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

Объект Горизонтальное факельное устройство

Вариант А)



источник тепла 800 оС

4 м

0,2 м

клинкерный кирпич 0,05 м

щебень 0,2 м

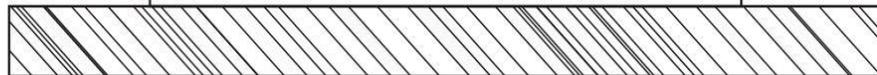
песок 0,1 м

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

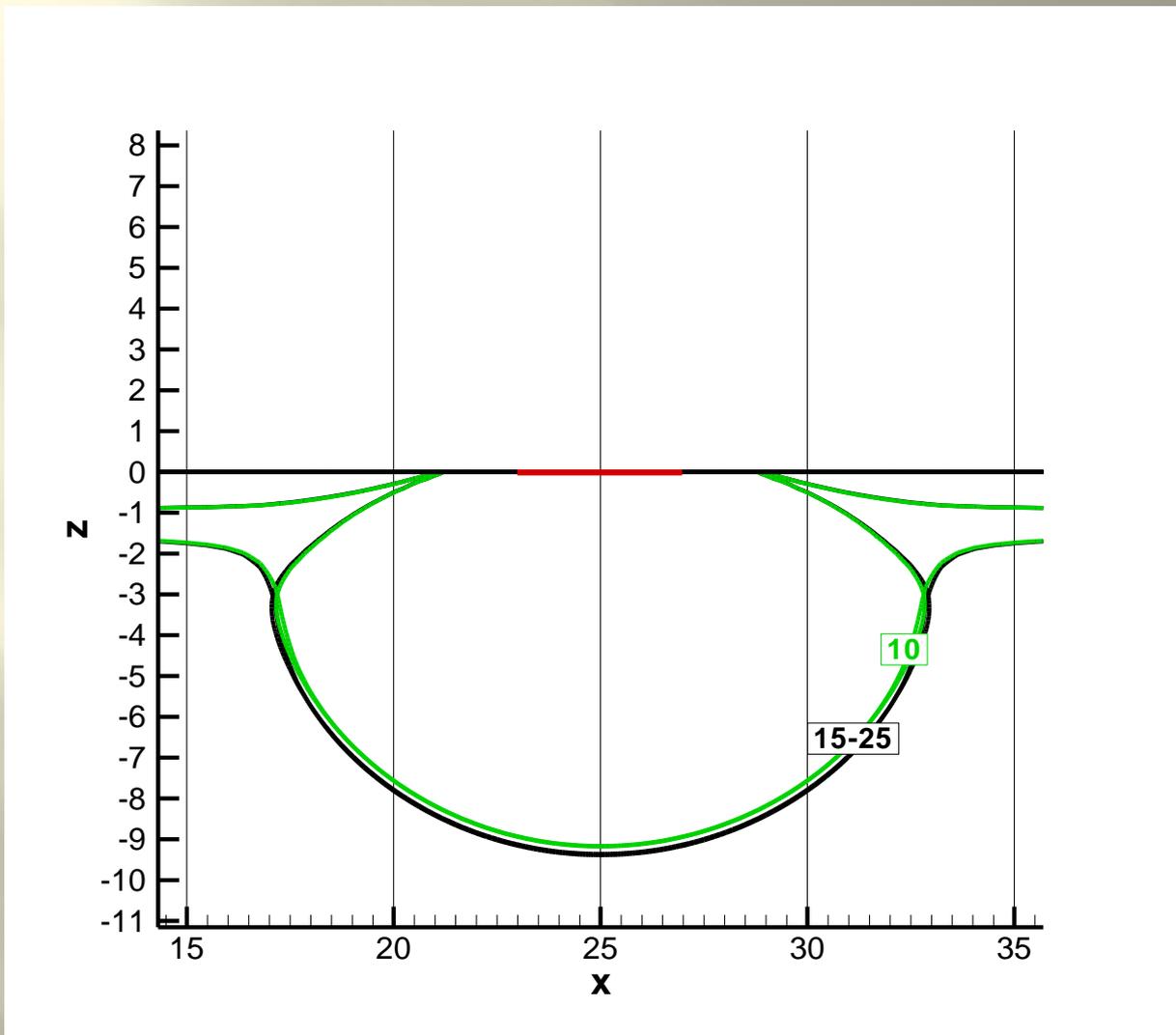
песок 3 м

ММП



Размеры факельного амбара 25*35 м.

РАСТЕПЛЕНИЕ ММП от ГФУ (пакет Flameground)



Обозначения нулевой изотермы:

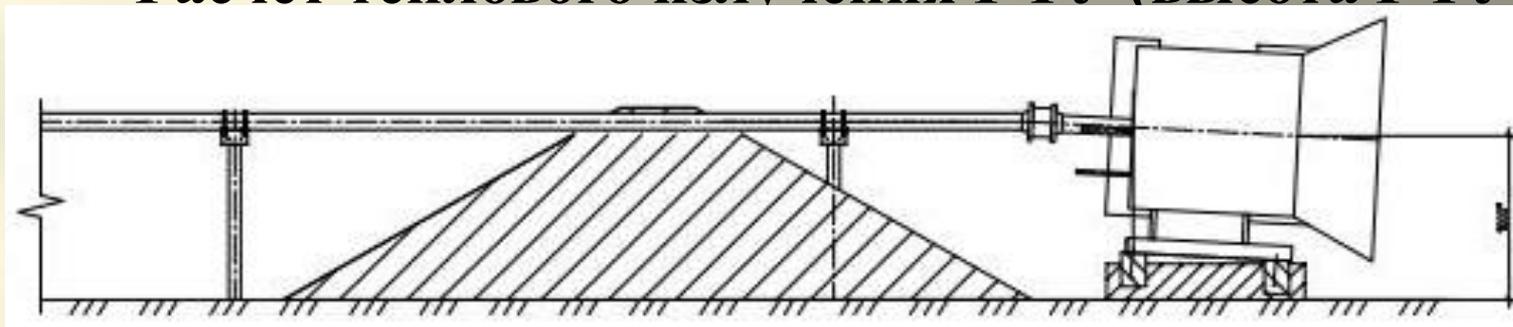
10 – зеленая сплошная – через 10 лет.

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



Моделирование теплового воздействия на ММП от периодически работающей ГФУ

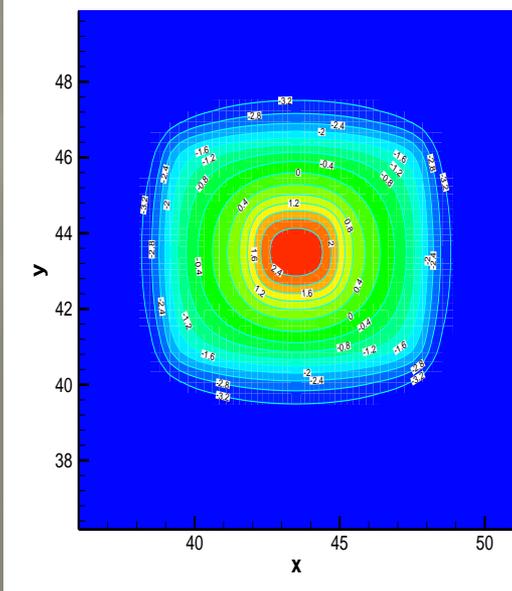
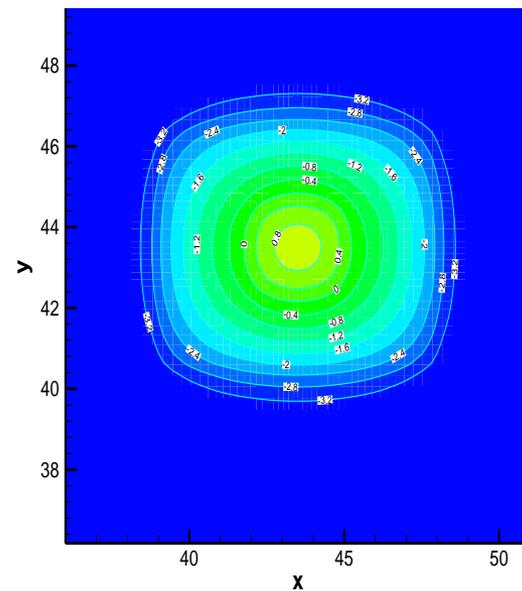
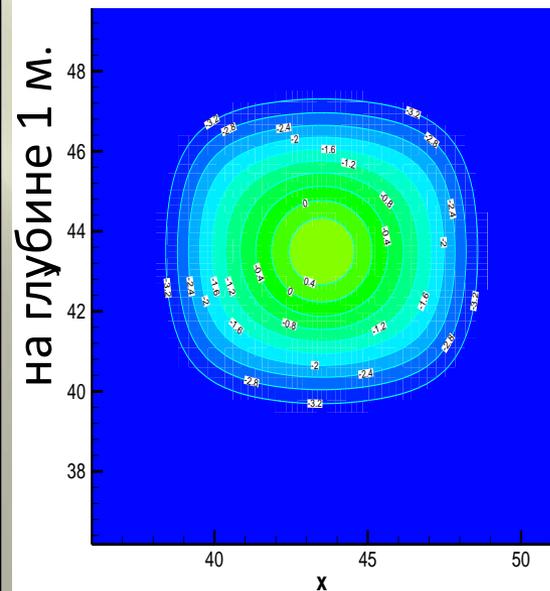
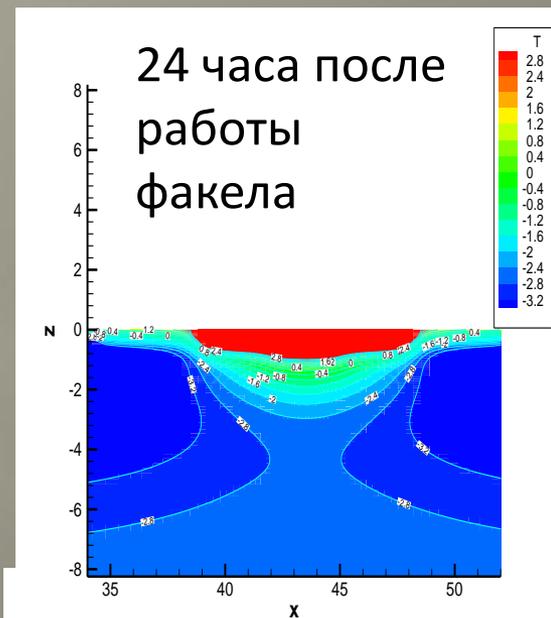
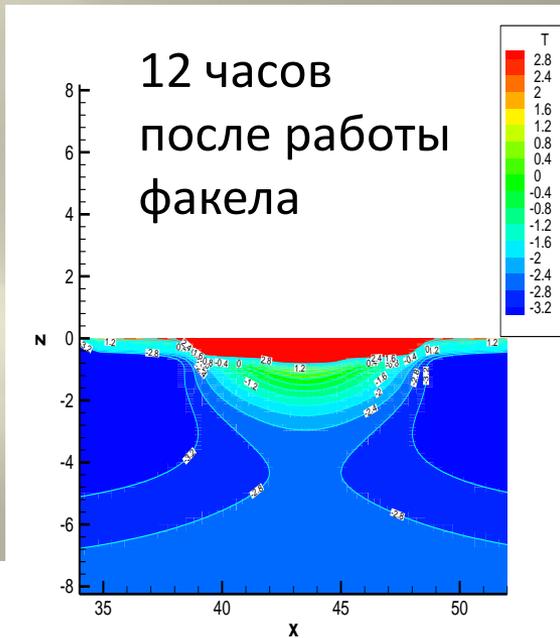
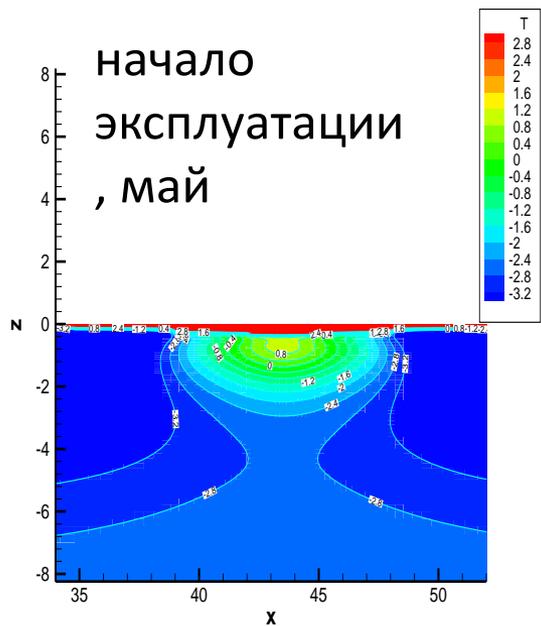
Расчет теплового излучения ГФУ (высота ГФУ 1 м)



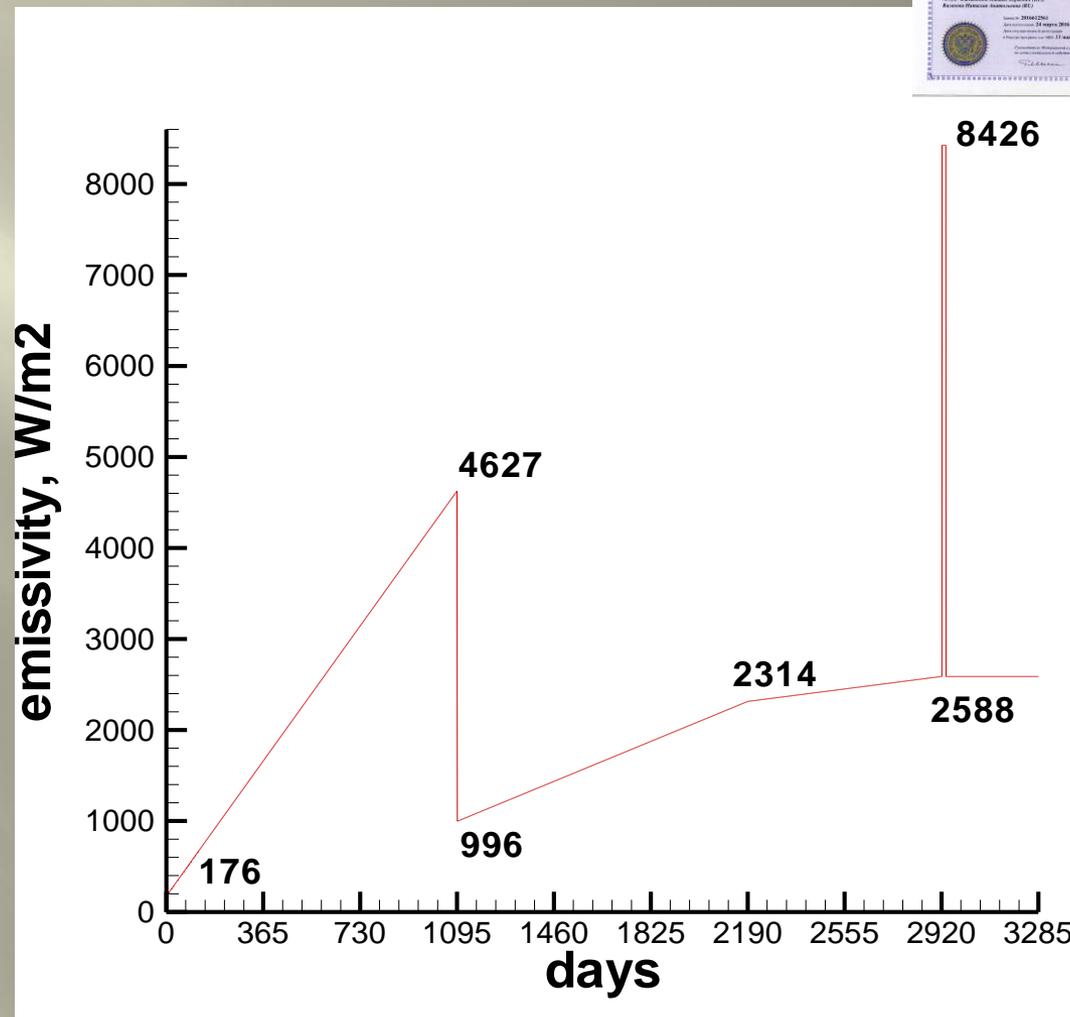
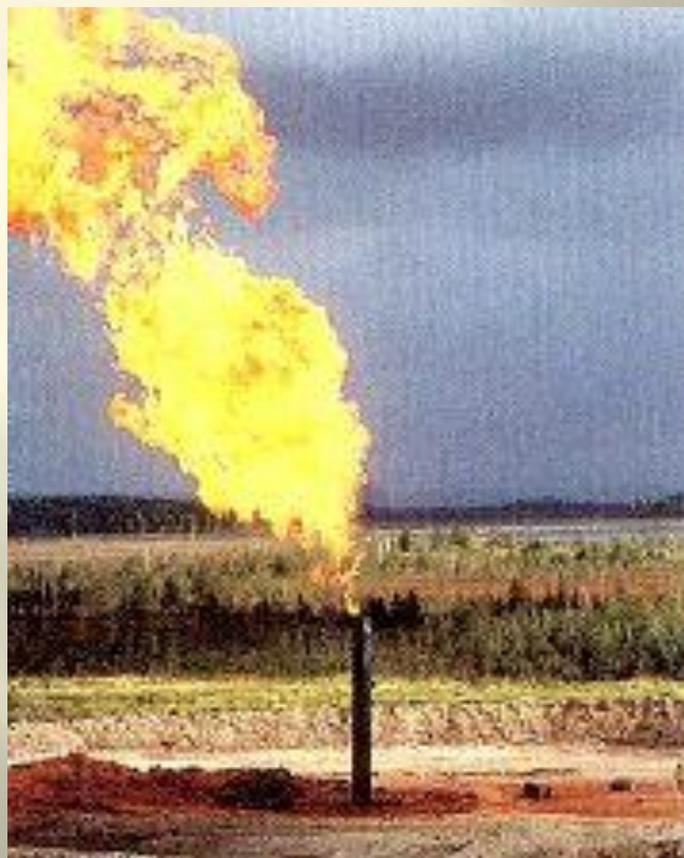
Расстояние от осн. факела (м)	Плотность теплового потока от пламени (кВт)
1	2064,651
5	185,5866
9	57,9958
25	8,911

Температура пламени факела 800-1000 °С.

ФАКЕЛЬНАЯ ПЛОЩАДКА, ЭКСПЛУАТАЦИЯ 1 час в неделю, МАКС. ТЕМПЕРАТУРА +820 С



4.5. Численные расчеты (факельные системы ВФУ) РАСТЕПЛЕНИЕ ММП от ВФУ на Куюмбинском месторождении 2015 г. (пакет Flameground-M)



Сценарий работы факельной установки в течение 8 лет.

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

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

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

$$\frac{\partial T}{\partial x} \Big|_{x=\pm L_x} = 0$$

$$\frac{\partial T}{\partial y} \Big|_{y=\pm L_y} = 0$$

$$\frac{\partial T}{\partial z} \Big|_{z=-L_z} = 0$$

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

$$f(x, y) = \begin{cases} 0, & \text{при } (x - x_f)^2 + (y - y_f)^2 > R_f \\ \left(1 - \left(\frac{\sqrt{(x - x_f)^2 + (y - y_f)^2}}{R_f} \right)^2 \right) P_f, & \text{при } (x - x_f)^2 + (y - y_f)^2 \leq R_f \end{cases} \quad (6)$$

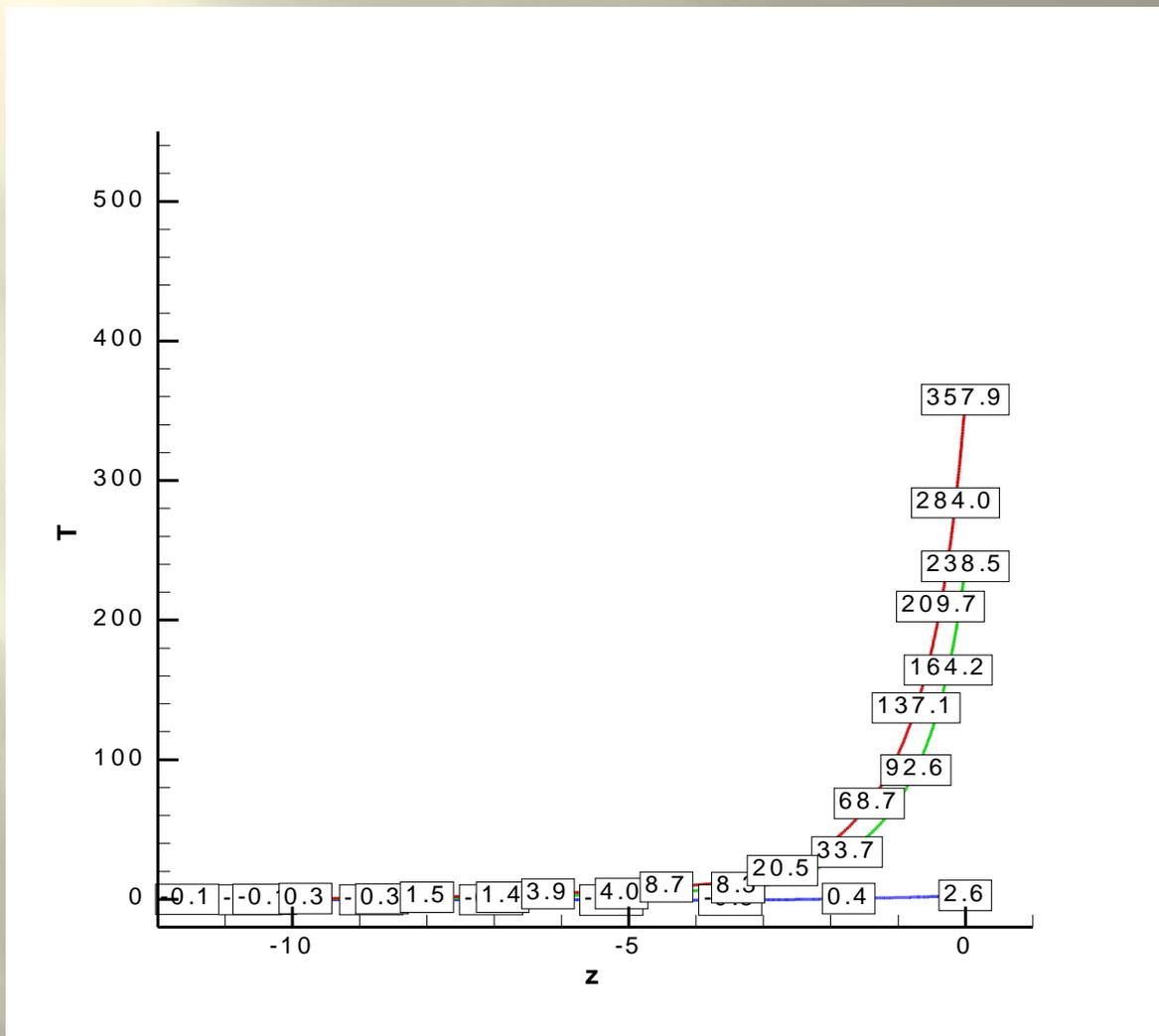
(x_f, y_f) - координаты центра факельной системы,
 R_f - радиус,

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"><thead><tr><th>№</th><th>Глубина слоя</th><th>грунт</th></tr></thead><tbody><tr><td>1</td><td>0-1,8 м</td><td>ИГЭ-м23</td></tr><tr><td>2</td><td>1,8-3,5 м.</td><td>ИГЭ-м83</td></tr><tr><td>3</td><td>3,5 -9,2 м.</td><td>ИГЭ-м77</td></tr><tr><td>4</td><td>9,2 – 50 м.</td><td>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																

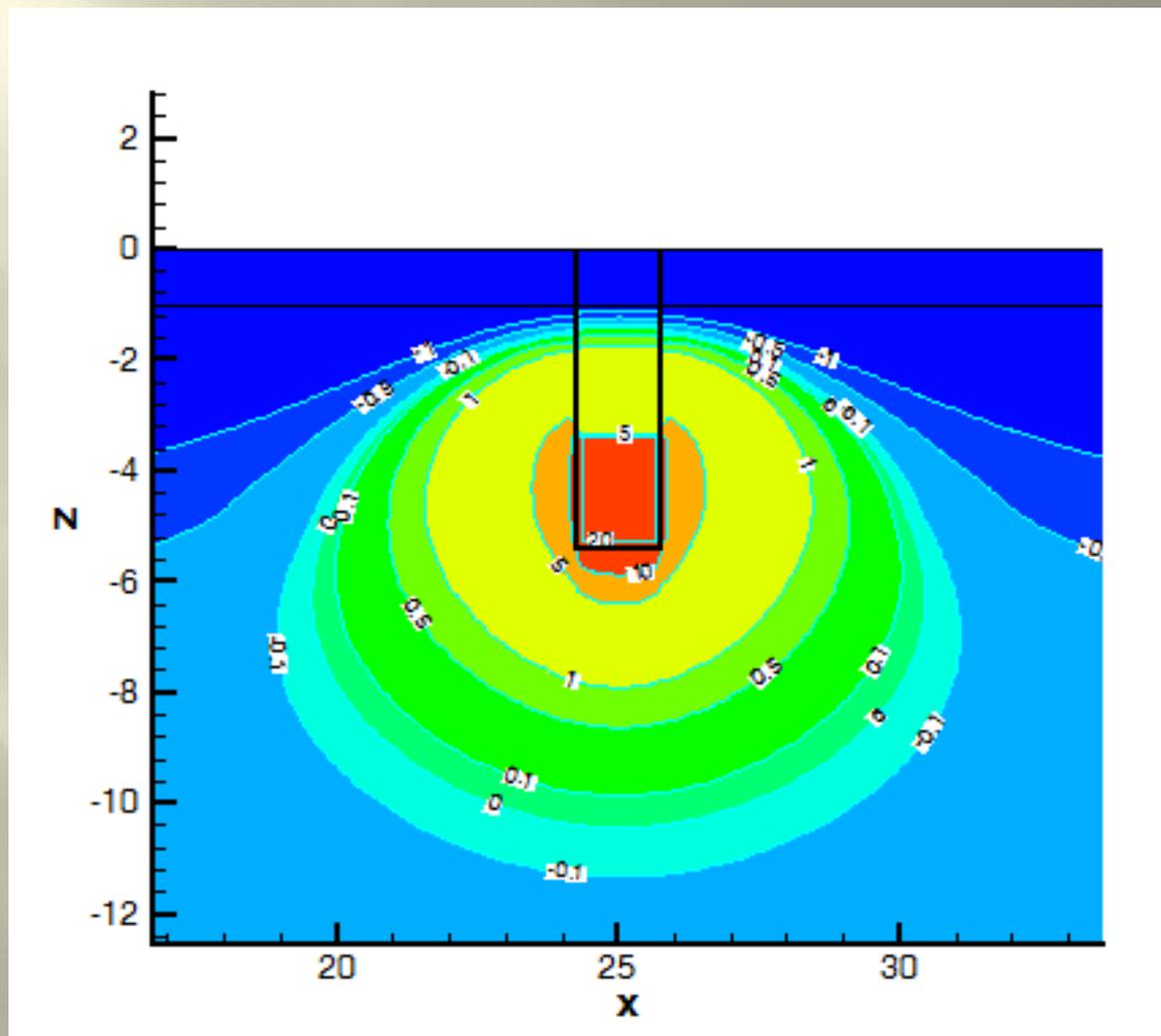
2,5 года работы факельной системы (сентябрь 2020), – профиль температуры вблизи поверхности.



Сравнение теплоизоляционных свойств различных материалов из пеностекла

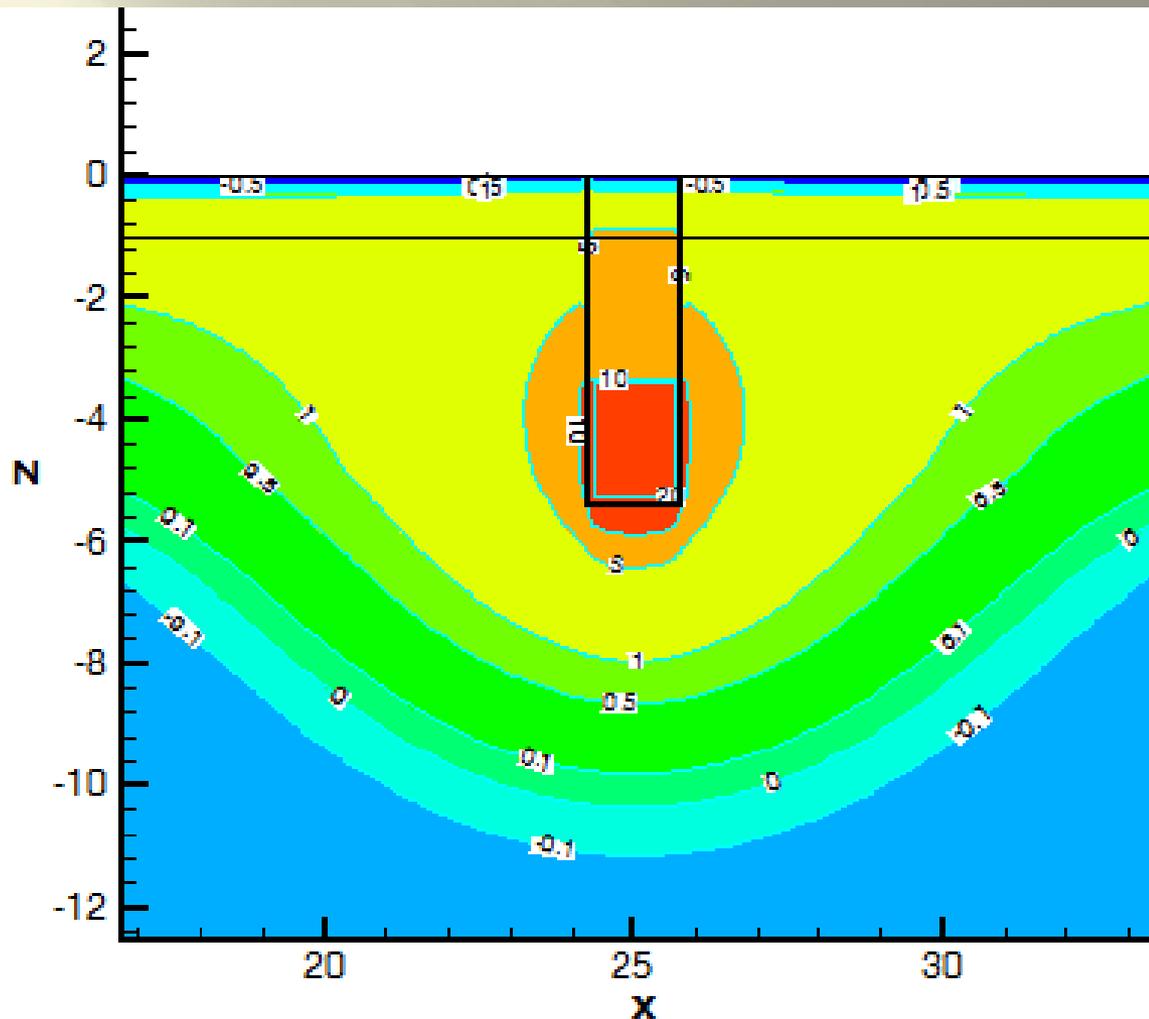
	плита, 10 см				гравий, 10 см.			
	D100		D250		D250		D600	
	горизонт таяния, м.	<i>Т°С на глуб. 4 м.</i>	горизонт таяния, м.	<i>Т°С на глуб. 4 м.</i>	горизонт таяния, м.	<i>Т°С на глуб. 4 м.</i>	горизонт таяния, м.	<i>Т°С на глуб. 4 м.</i>
1 год	6.35	2.28	6.60	2.65	6.30	2.18	6.40	3.48
2 года	10.10	8.61	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

4.5. РАСТЕПЛЕНИЕ ММП от подземных теплоизолированных емкостей, заполненных флюидом с меняющейся температурой



РАСТЕПЛЕНИЕ ММП

от подземных теплоизолированных емкостей,
заполненных флюидом с меняющейся температурой



Конкурентные преимущества пакета Wellfrost

1. Данный комплекс программ был апробирован на 11 нефтегазовых месторождениях и показал **точность около 5%** при сравнении с экспериментальными данными.
2. 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**, который позволяет опосредованно учесть и меняющуюся толщину снега, и число солнечных дней в году, и особенность верхнего слоя грунта и т.п.
3. Проведение численных расчетов по обустройству кустовых площадок для месторождений дает **ощутимый экономический эффект**. Например, для Сузунского и Тагульского нефтегазовых месторождений на основании расчетов, проведенных **в 2010 году**, были выработаны рекомендации по отсыпке площадок, давший экономический эффект более **60 млн. рублей**. **В 2012 году проведенные расчеты позволили сократить на 50% размер рабочих площадок** для размещения устьев добывающих нефтяных скважин для Восточно-Уренгойского ЛУ Валажинской залежи.



Система облачных вычислений Wellfrost



Сотовый телефон,
планшет
или компьютер

Параметры скважины



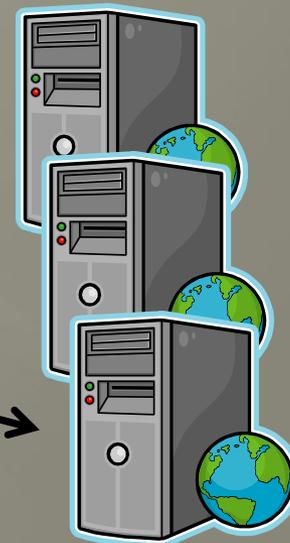
Результаты расчётов

Распределение
заданий в облаке.
Сбор результатов.



Сервер планирования нагрузки
и взаимодействия
с пользователями

Вычислительное
суперкомпьютерное
облако



Созданная система Wellfrost (**вычислительное ядро и облачная среда**) проходит тестирование и будет позволять удаленно получать **долгосрочные прогнозы на суперЭВМ** по динамике растепления **ММП** от различных инженерных объектов на кустовых площадках в зависимости от географического положения, технических параметров скважин и литологии грунта.

Выводы

1. На основе новой математической модели разработаны комплексы программ («Wellfrost», /«TermoFrost»/, «Flameground») для численного трехмерного долгосрочного моделирования нестационарных тепловых полей в приповерхностном слое **ММП со сложной литологией от различных технических систем.**
 2. *Разработанные комплексы программ позволяют проводить расчеты на суперЭВМ по долгосрочному прогнозированию техногенных и климатических влияний на процессы деградации вечной мерзлоты **в Приполярных и Арктических районах**, в том числе и с использованием **облачных технологий.***
 3. Результаты численных расчетов совпадают с экспериментальными данными **с точностью до 5%.** Проведены расчеты для **11-ти северных нефтегазовых месторождений.**
 4. Проведение численных расчетов по обустройству кустовых площадок для месторождений дает **ощутимый экономический эффект.**
-

Спасибо за внимание!