



РОСНЕФТЬ

ОТКРЫТОЕ АКЦИОНЕРНОЕ ОБЩЕСТВО
НЕФТЯНАЯ КОМПАНИЯ



SPE Moscow Section

ГРП «Высокие давления» или практическое применение геомеханического моделирования

Докладчик: Летичевский Александр, ОАО «Самаранефтегаз»

“High pressure” hydraulic fracturing or practical experience of geomechanical modeling

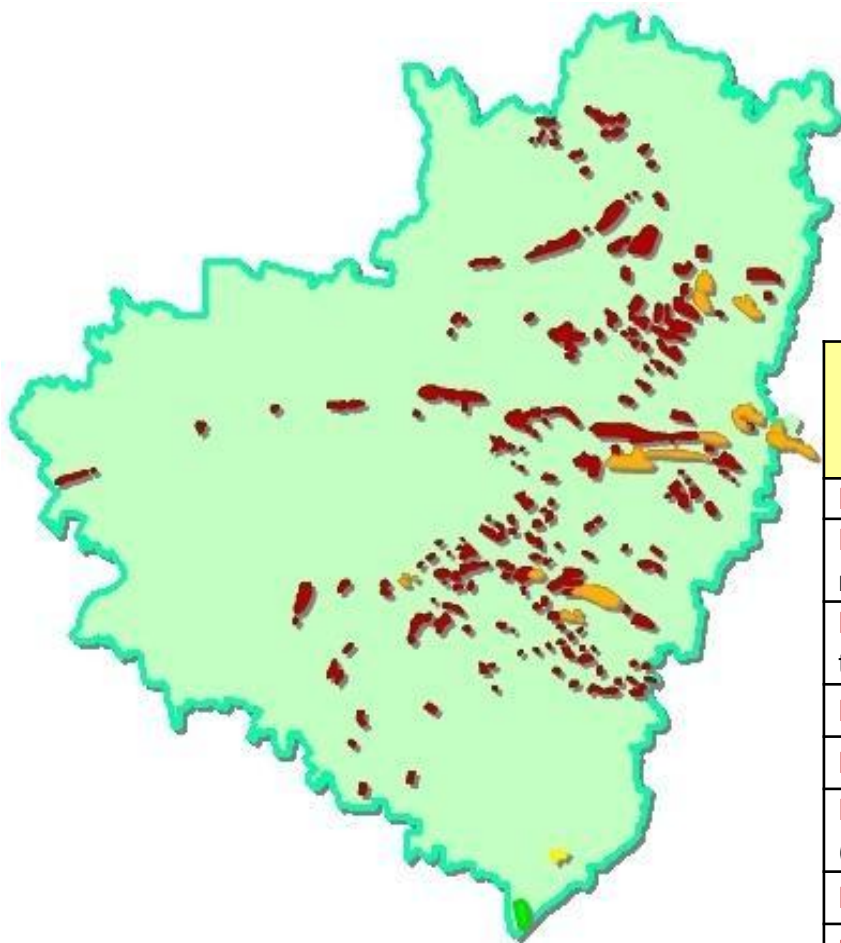
Presenter: Alexander Letichevskiy, OJSC Samaraneftegaz

Содержание (Content)

- **История и особенности ГРП в Самарском регионе**
(History and special aspects of hydraulic fracturing is Samara region);
- **Применение механических свойств для планирования процессов ГРП**
(Rocks properties application for hydraulic fracturing planning);
- **Применение специальных методов ГИС для оптимизации ГРП**
(Special wire line survey application for hydraulic fracturing optimization);
- **Построение геомеханической модели**
(Geomechanical model construction);
- **Примеры использования геомеханического моделирования**
(Examples of geomechanical modeling application);
- **Направления распространения трещин ГРП**
(Fracture directions);
- **Выводы**
(Summary)

Самарская область (Samara region)

- Более 150 месторождений УВ (More than 150 oil field);
- Суточная добыча нефти свыше 30000 т/сут (Daily oil production rate over 30000 t/day);
- Тип коллекторов: терригенный и карбонатный (Formation type: sandstone and carbonate)



Параметры* (Parameters)	Пределы изменения (Range)	Среднее значения (Average)
Глубина залегания, м (True vertical depth, m)	500-3640	2100
Нефтенасыщенная толщина пласта, м (Net pay, m)	0.5-24	4.5
Пластовая температура, °C (Formation temperature, °C)	18-97	49
Пористость, д.ед. (Porosity, fraction)	0.05-0.27	0.164
Проницаемость, мД (Permeability, mD)	2-6630	373
Начальное пластовое давление, атм (Initial formation pressure, atm)	55-390	223
Плотность нефти, г/см ³ (Oil density, g/cm ³)	0.536-0.926	0.8
Вязкость нефти, сП (Oil viscosity, sP)	0.19-315	9.7
Газовый фактор, м ³ /т (GOR, m ³ /t)	2.7-494	54
Давление насыщения, атм (Bubble point pressure, atm)	26-294	66

История ГРП в регионе (Frac's history in region)



- 1950 – первый опыт проведения ГРП: кислотный разрыв + закрепление речным песком
(1950 – first experience of fracturing: acid frac + river sand);
- 2002 – начало производства «классических» ГРП в промышленных масштабах
(2002 – industrially beginning of «conventional» hydraulic fracturing operations);
- выполнено более 520 операций ГРП: 65% пропантных и 35% кислотных
(more than 520 fracturing operation were done: 65% proppant fracs and 35% acid fracs);
- добыто более 1,2 млн. тонн дополнительной нефти
(more than 1,2 MM tons of incremental oil production)

Особенности проведения ГРП в регионе (Special aspects of fracturing in region)

- Низкие значения эффективности жидкости ГРП (Low fluid efficiency);
- Наличие близлежащих водонасыщенных пластов и отсутствие мощных глинистых перемычек (Existence of closer water layers and deficiency of shale barriers);
- Повышенные требования к остаточной проводимости трещин ГРП (High requirements to retained fracture conductivity);
- Высокие градиенты разрыва или наличие зон с аномально высокими давлениями разрыва (High fracture gradients or existence of formation fracture pressure anomalous zones)

Параметры* (Parameters)	Приобское месторождение (Priobskoe field)	Месторождения Самарской области (Samara region fields)	
Глубина залегания, м (True vertical depth, m)	2300-2700	1600-1800	2800-3640
Модуль Юнга, 10^5 МПа (Young's modulus, MPa)	0,10-0,17	0,17-0,27	0,30-0,41
Градиент разрыва, кПа/м (Fracture gradient, kPa/m)	11,0-13,9	10-14	10-22
Коэффициент утечек, см/мин ^{1/2} (Leakoff coefficient, cm/min ^{1/2})	61-76	213-335	100-274
Мгновенные утечки, см ³ /см ² (Sprut loss coefficient, cm ³ /cm ²)	0-0,08	0,08-0,16	0,08-0,17
Эффективность жидкости гидроразрыва, % (Fluid efficiency, %)	30-60	5-14	7-30
Чистое давление, МПа (Net pressure, MPa)	6-7	5-8	8-15

Механические свойства горных пород (Rock properties)

Модуль Юнга (E)

(Young's modulus)

Коэффициент Пуассона (ν)

(Poisson's ratio)

Трещиностойкость (θ)

(Fracture toughness)

Вертикальные напряжения (σ_v)

(Vertical stress)

Макс. горизонтальные напряжения (σ_H)

(Max. horizontal stresses)

Модуль сдвига (G)

(Shear modulus)

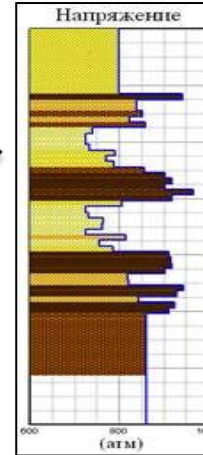
Предел прочности на сжатие (δ)

(Compressive resistance)

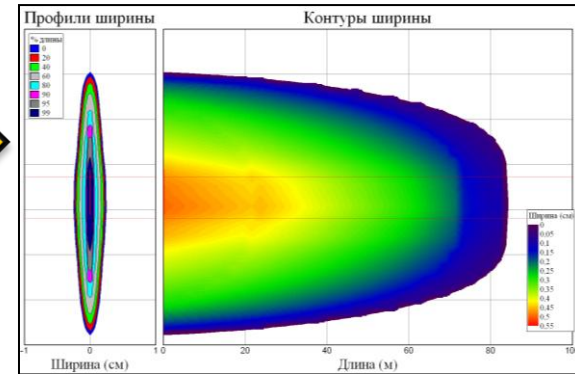
Пластовое давление ($P_{пл}$)

Pore pressure

Мин. горизонт напряжения (σ_h)
(Min. horizontal stresses)

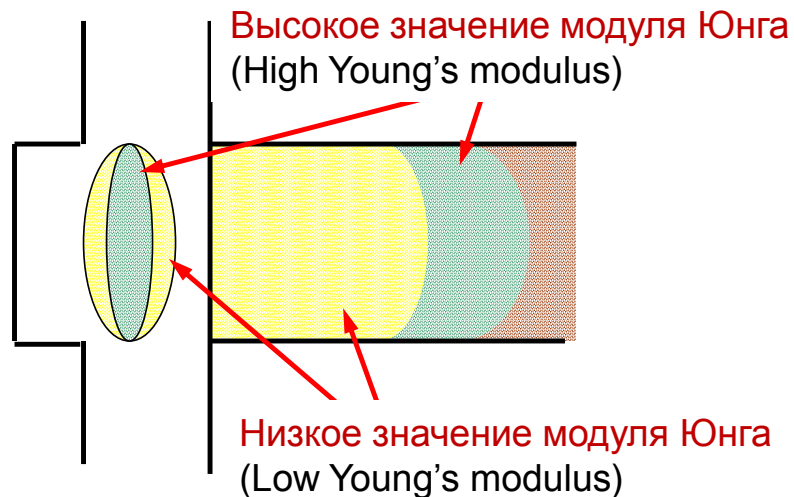


Дизайн ГРП
(Frac design)

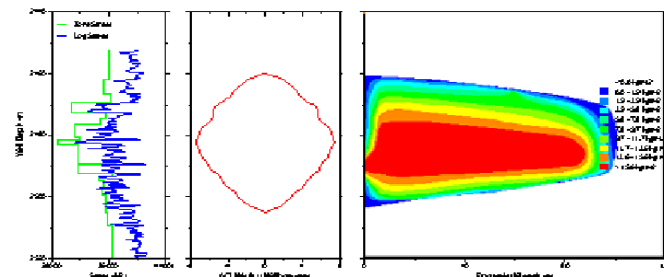


Геомеханическая модель (2D)
(Geomechanical model 2D)

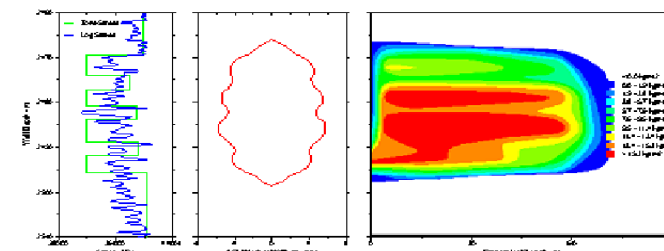
Механические свойства горных пород (Rock properties)



«Табличные»
данные
(«Table» Data)



«Реальные»
данные
(«Real» Data)

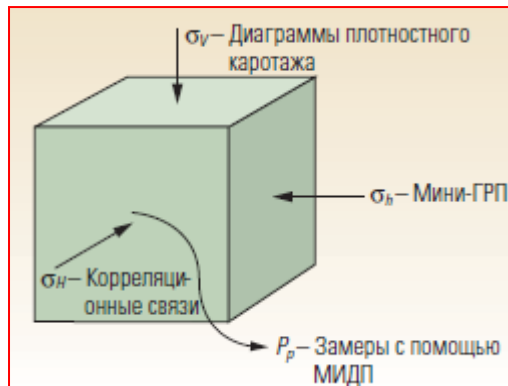


2011г.- Начало проведения лабораторных исследований кернового материала и внедрение специальных методов ГИС - кросс-дипольный широкополосный акустический каротаж

(2011 – Initiation of core analysis and implementation of the cross-dipole sonic tools)

- ✓ Оптимизация дизайнов ГРП (Design optimization)
- ✓ Снижение рисков «СТОПов» (Screen out reduction)
- ✓ Предотвращение прорыва трещины в в/н пласты (Fracture breakthrough prevention into water formations)

Методы определения механических свойств (Rock properties estimations)

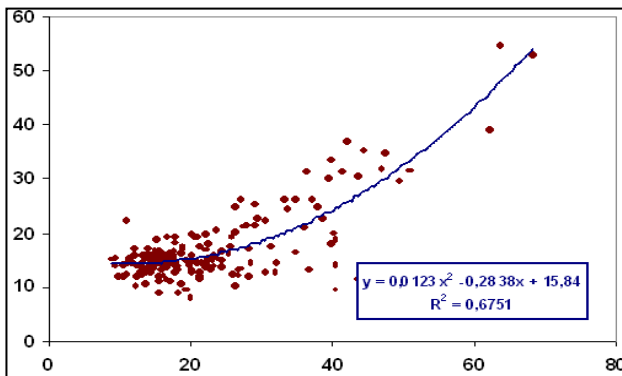


Профиль мин. горизонтальных напряжений (Min. horizontal stress profile)

$$\sigma_h = \left(\frac{E^h}{E^v} \right) \cdot \left(\frac{\nu_v}{1 - \nu_h} \right) \cdot (\sigma_v - \alpha \cdot p) + \alpha \cdot p + T^*$$

Механические свойства (Rock properties)

Корреляция E_{дин.} – E_{стат.} Юганскнефтегаз (E_{dyn} – E_{stat} Correlation Yuganskneftegaz)



Динамические (Dynamic) Спец. методы ГИС (Wire line survey)

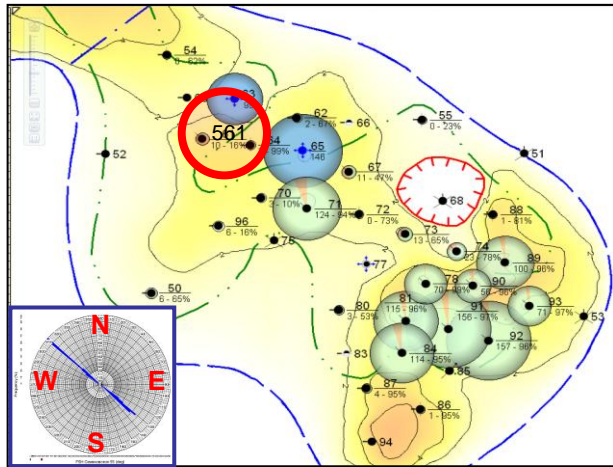
- + Профиль свойств (Rock properties profile);
- + Направление трещины ГРП (Stress/fracture direction);
- + Высота трещины ГРП (Fracture height).
- Необходимы пересчетные корреляции для применения (Correlations must be used).



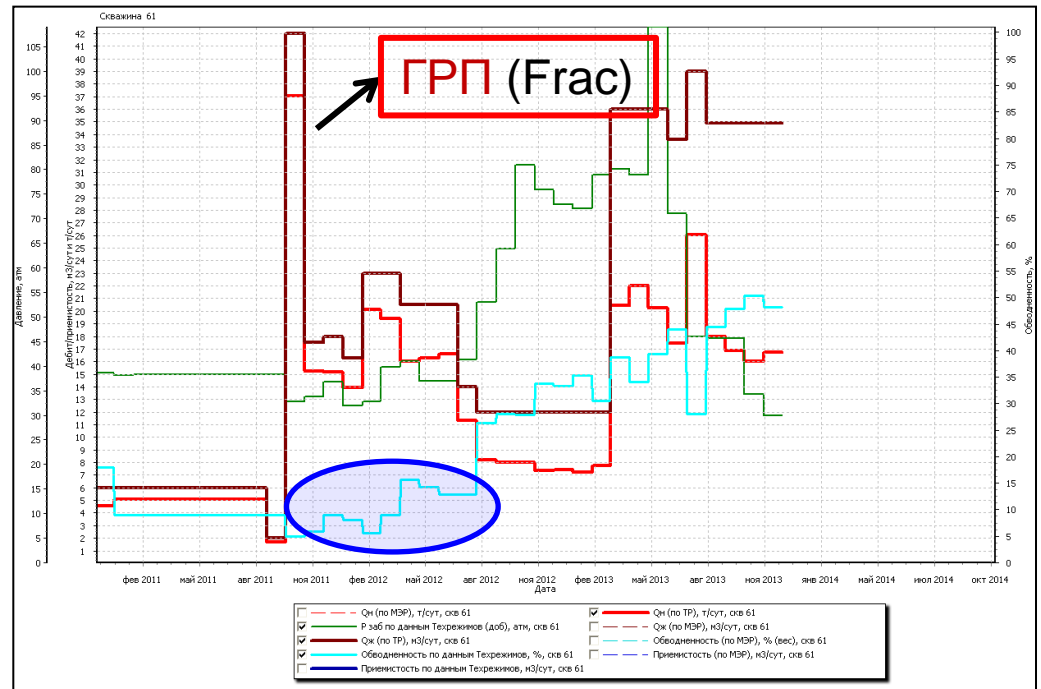
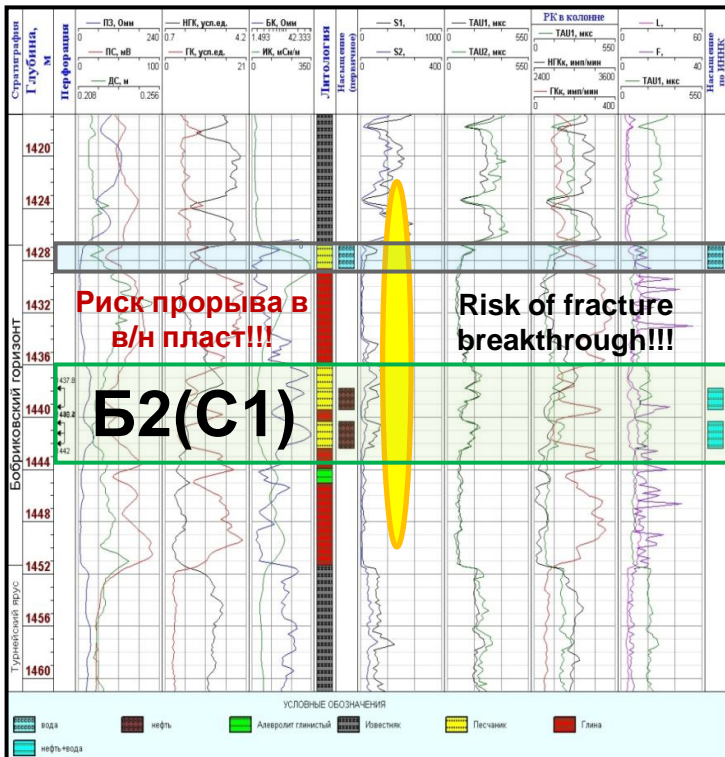
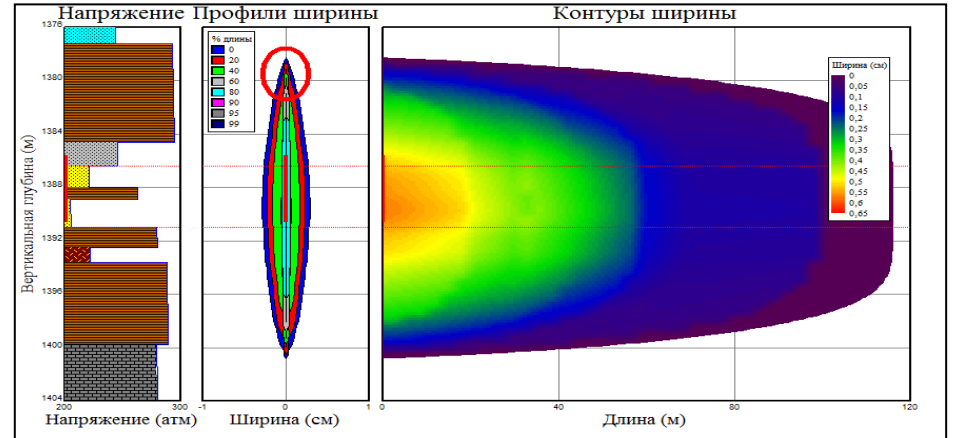
Статические (Static) Лабораторные исследования керн (Core analysis)

- + Можно сразу использовать для дизайна (Can be used for design without correlations);
- + Доп. исследования (Different measurements);
- + Предел прочности на сжатие (Compressive resistance).
- «Точечные замеры» («Point measurements»);
- Неориентированные напряжения (Nonaligned measurements).

Спец. ГИС на скв. № 561 Горбуновское месторождение (Special wire line survey on well № 561 Gorbunovskoe field)



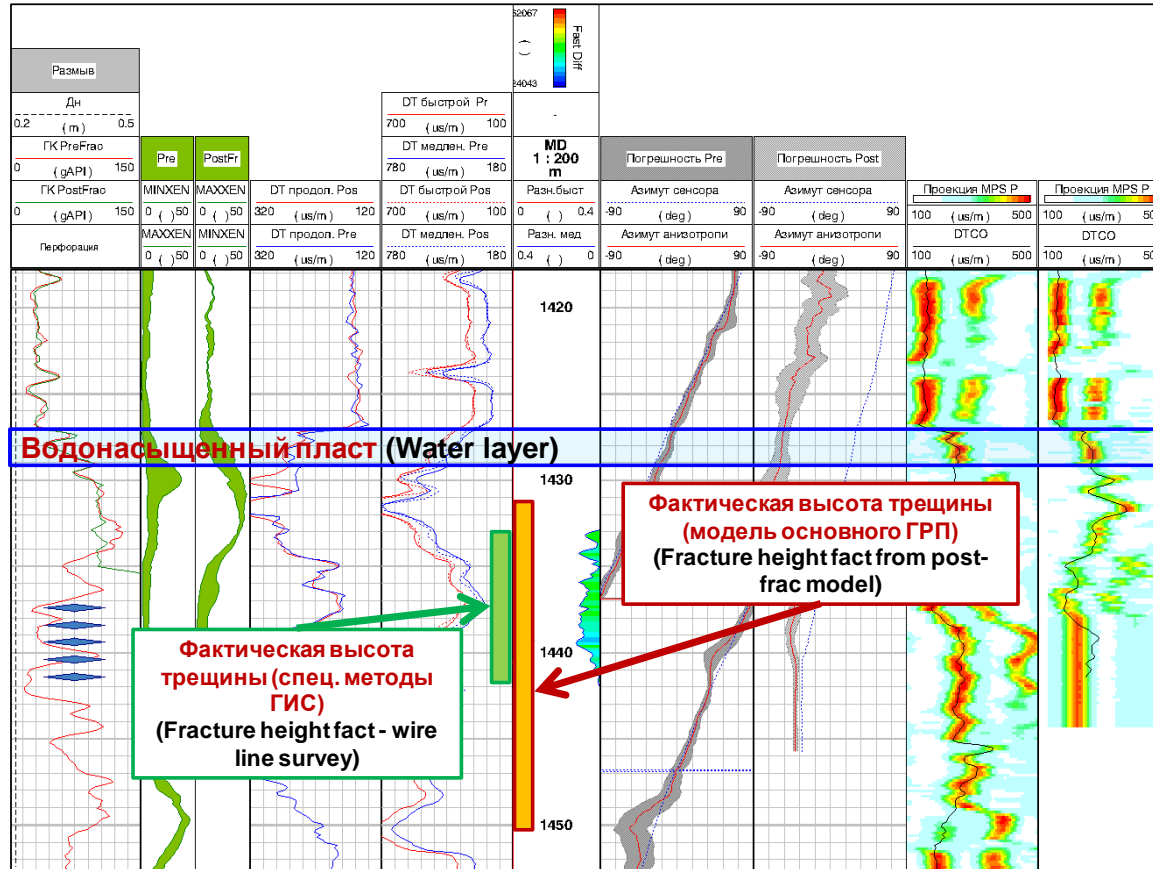
Анализ проведенного ГРП (Post-frac analysis)



* условные номера скважин (conventional numbers of wells)

Спец. ГИС на скв. № 561 Горбуновское месторождение (Special wire line survey on well № 561 Gorbunovskoe field)

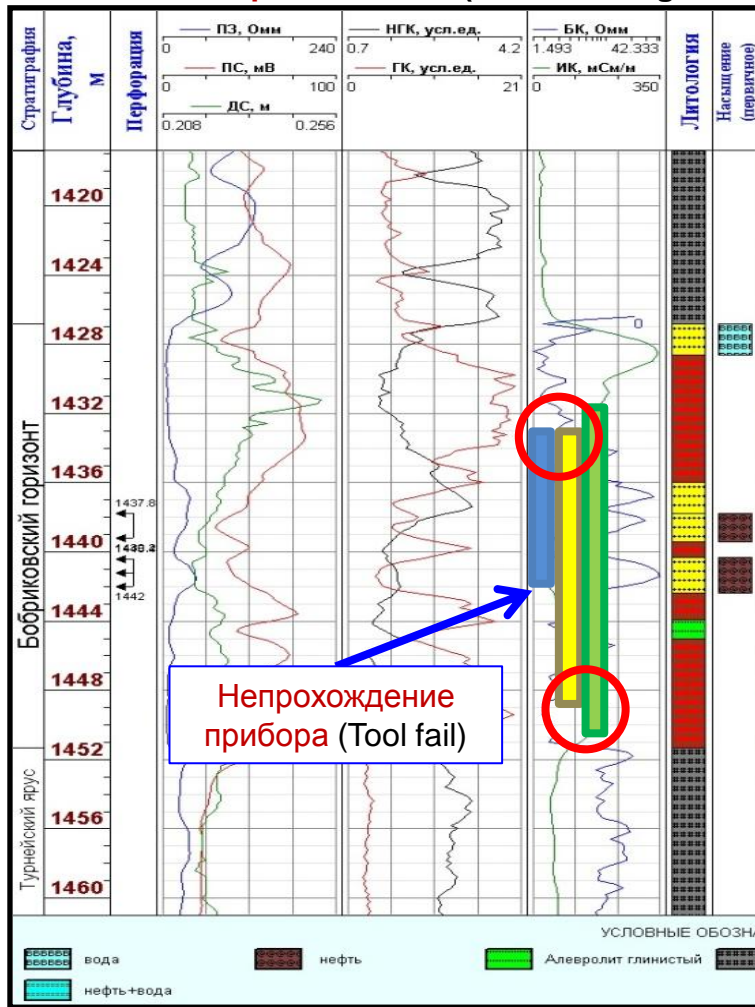
Данные повторного кросс-дипольного АКШ после ГРП (cross-dipole sonic tool data after fracturing)



В результате проведенных ГИС был подтвержден факт отсутствия прорыва трещины ГРП в водонасыщенный пласт!!!
(Result of wire line survey: No fracture breakthrough into upper water saturated formation!!!)

Спец. ГИС на скв. № 561 Горбуновское месторождение (Special wire line survey on well № 561 Gorbunovskoe field)

Сравнение высоты трещины ГРП (Fracture height comparison)



Высоты сопоставимы
(Fracture heights are correlated)



Данные спец. методов ГИС применимы
(Special wire line survey data are valid)



**Начало геомеханического моделирования
в Компании**
(Initiation of geomechanical modeling in
Company)

- Спец. ГИС (Special wire line survey)
- Программный модуль - динамические свойства (Program module – dynamic properties)
- Модель основного ГРП - статические свойства (post-frac model - static properties)

Построение геомеханической модели (Geomechanical model construction)

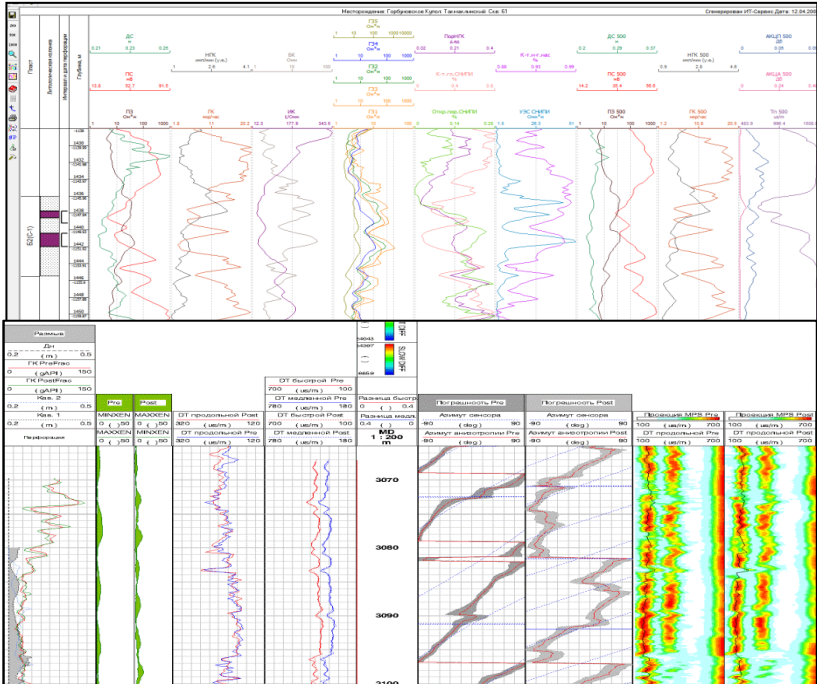
- Входные данные (Input data):**
- анализ мини-ГРП (Data-frac analysis);
 - первичный каротаж (ПК, НГК, ПС и т.д.) и данные ИННК (Primary logs: GR, NGR, SP and ect.);
 - результаты интерпретации спец. ГИС (results of special wire line survey);
 - программа RN Mech Prop - собственная разработка (RN Mech Prop program - own development).

Анализ мини-ГРП (Data-frac analysis)



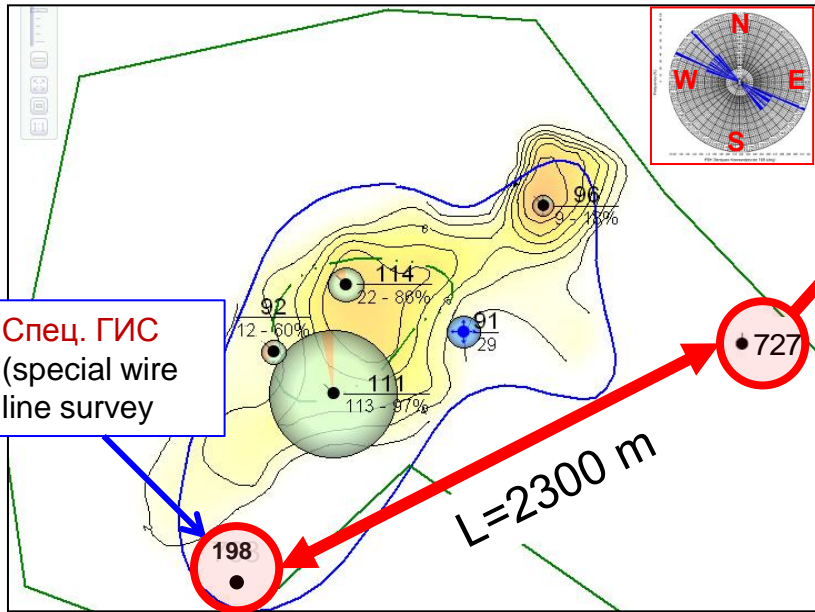
Параметры для матчинга (Parameters for matching)

- Основные допущения для построения геомеханической модели (Main assumptions for geomechanical model construction):**
- ✓ **Overburden = 0,252 атм/м** на основании ГГК - по соседним скважинам (Overburden = 0,252 atm/m from GGR log (neighbor wells);
 - ✓ Константа Биота $\alpha = 1$ по всему разрезу (Biot-Willis poroelastic constant $\alpha = 1$ for whole cross section);
 - ✓ $E_{sv}/E_{sh} = 1$ по всему разрезу (for whole cross section);
 - ✓ $E_{статич} = (-2.21 \times \phi + 0.963) \times E_{динамич}$ - корреляция Моралеса (Morales's correlation);
 - ✓ $v_{статич} = v_{динамич}$ - из-за отсутствия достаточных статистических данных ($v_{static} = v_{dynamic}$ - because there is not enough statistic data).

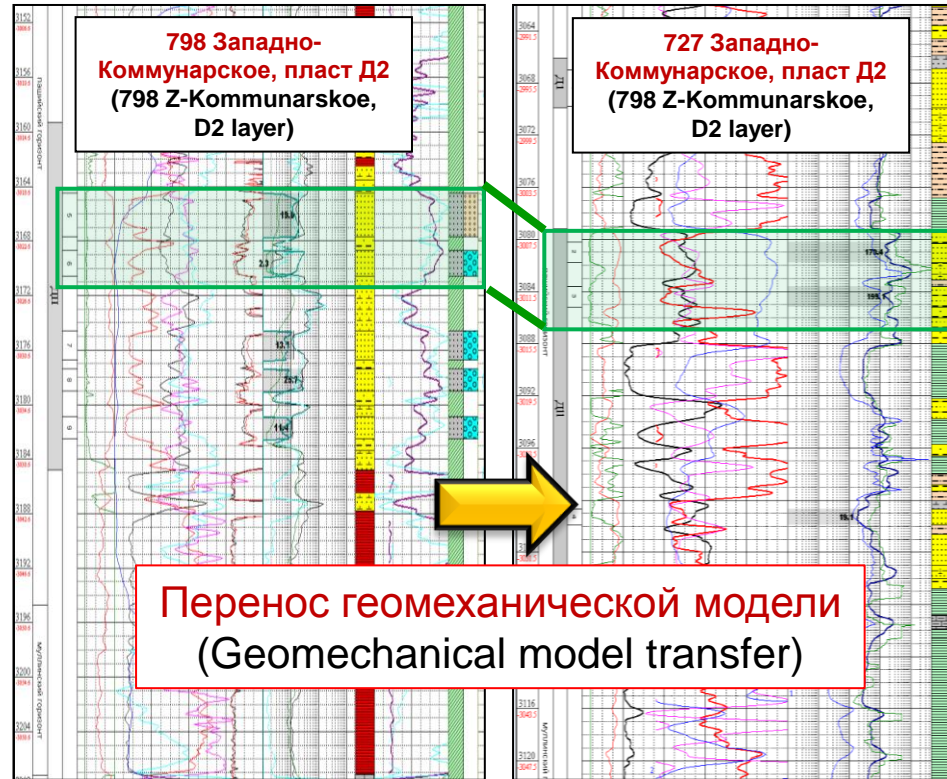


Пласт	№ скважины - месторождение	Тип	Давление бокового сжатия, МПа	Модуль Юнга, ГПа	Коэф-т Пуассона	Предел прочности, МПа
Б2	602 - Горбуновское	алевролит	29,2	нагрузка: 62,3	нагрузка: 0,138	-
		алевролит	29,2	54,1	0,042	360,9
		алевролит	29,2	57,1	0,085	315,7
		песчаник	0	7,5	0,161	38,2

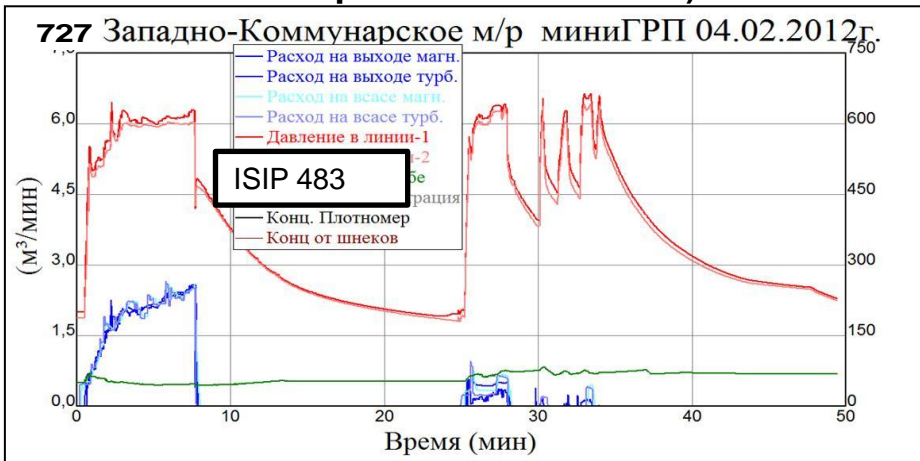
Геомеханическая модель для скв. № 727 З-Коммунарского м-я (Geomechanical model for well № 727 Z-K field)



Скв. № 727 (Well № 727):
 Целевой объект: пласт Д2 (target layer – D2)
 Н/н толщина = 3,2 м (Net pay = 3,2 m)
 Рпл тек = 237 атм ($P_i = 237$ atm)
 Рнас = 88,7 атм ($P_b = 88,7$ atm)
 Ост. запасы нефти = 21 тыс. т (ROIP = 21 M ton)



Попытка мини-ГРП на скв. 727 (Data-frac attempt on the well №727)



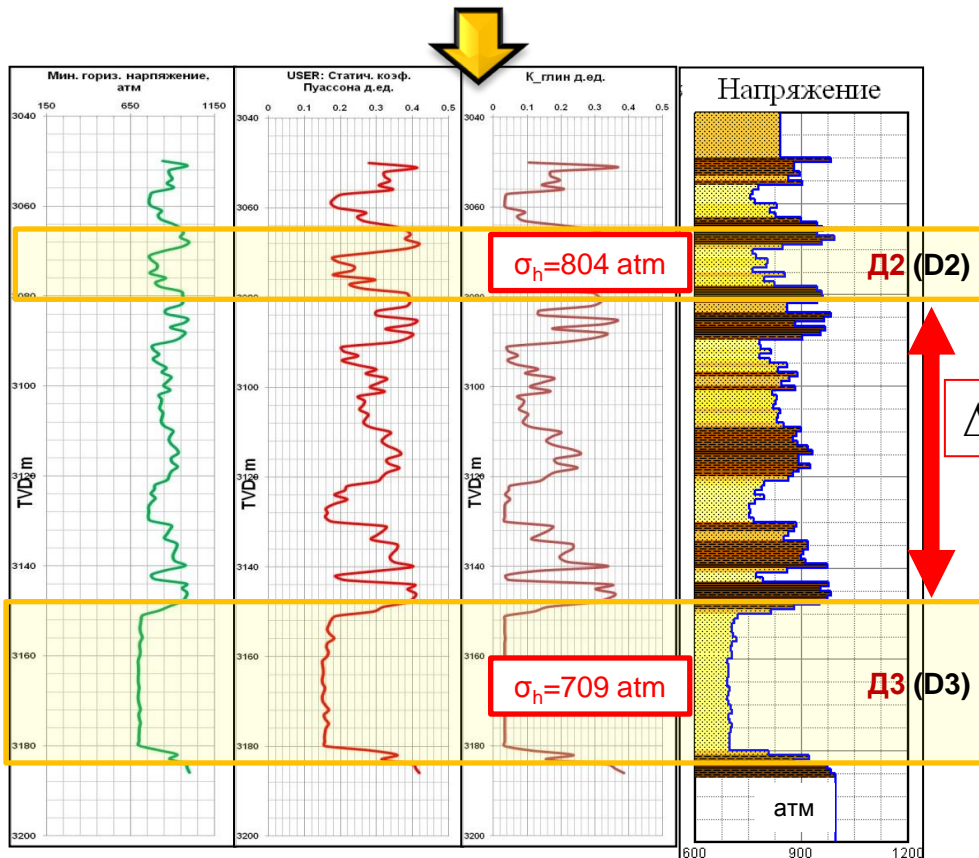
Перенос геомеханической модели (Geomechanical model transfer)

Геомеханическая модель для скв. № 727 З-Коммунарского м-я (Geomechanical model for well № 727 Z-K field)

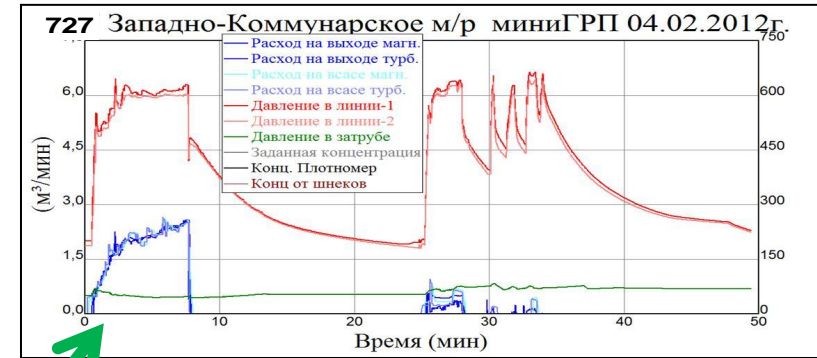
Геомеханическая модель скв. №727 З-Коммунарского м-ня (Geomechanical model for well №727 Z-Kommunzrskoe field)

Геомеханика (Geomechanic model)

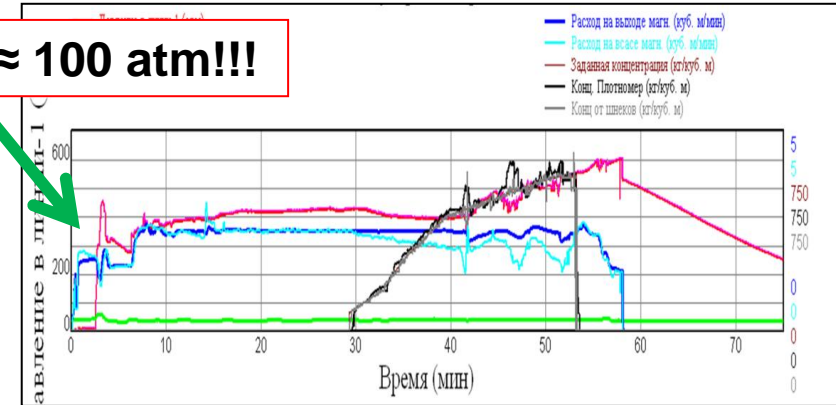
Градиенты (Gradient)		Тектоника (Tectonic)	352	Коеф. Пуассона (Poisson's ratio)		Коеф. трещин-сти (Fracture toughness)	
Overburden	0.252 атм/м			глины (shale)	0.42	глины (shale)	1 100.00
Гидростат. (Hydrostatic)	0.101 атм/м			песчаник (sandstone)	0.150	песчаник (sandstone)	900.00



Отскок от ГРП на D2 (Failure Frac at D2)



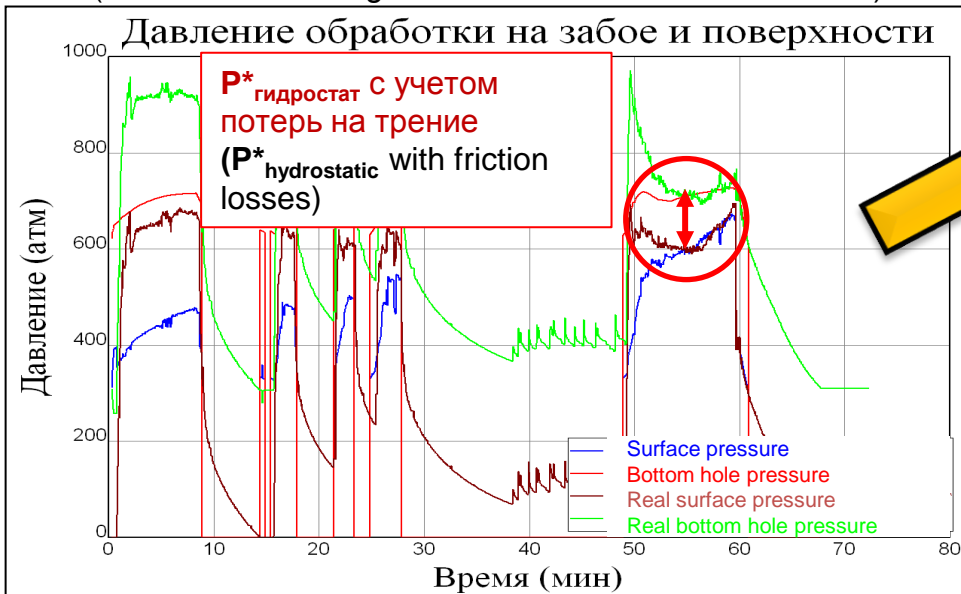
Успешный ГРП на D3 (Successful Frac at D3)



$\Delta\sigma_h \approx 100 \text{ atm!!!}$

Причина «отскока» ГРП на пласт Д2 3-К м-я (Reason of failure frac at D2 formation Z-K field)

Матчинг мини-ГРП на скв. №798 3-Коммунарского м-ня
(Data-Frac matching well №798 Z-Kommunarskoe field)



$$P_{\max \text{ bh}} = P_{\text{surf}} + P^*_{\text{hydrostatic}} = 600 + 100 = 700 \text{ atm} < 800 \text{ atm}$$

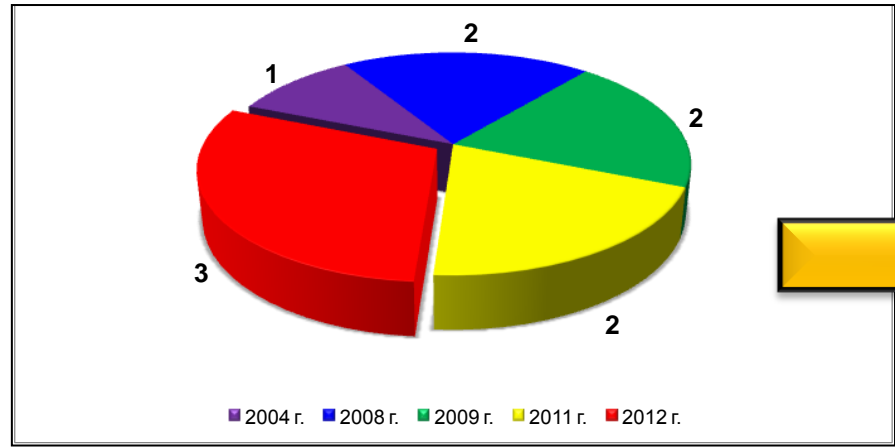
Для успешного ГРП на скв. № 727 необходимо создать давление на устье **более 800-900 атм**
(The surface pressure during operation must be more than **800-900 atm** for successful Frac on well № 727)

Нет возможности «порвать» пласт Д2 3-Коммунарского месторождения из-за ограничения по давлению текущего оборудования подрядчика по ГРП (подвеска, насосы, арматура и т.д.)

(No options (possibility) to «frac» D2 formation due to current service company equipment pressure limitations: tubing, pumps and ect.)

В 2012 году проведен 1-ый ГРП с флотом на 1000 атм на скв. № 862 Тверского месторождения
(The first frac with «1000 atm» fleet was successfully done at well № 862 Tverskoe field in 2012)

Кол-во «отскоков» из-за высоких давлений разрыва
(Quantity of failure frac operation due to high treatment pressure)



Особенности геомеханического моделирования (Special aspects of geomechanical modeling)

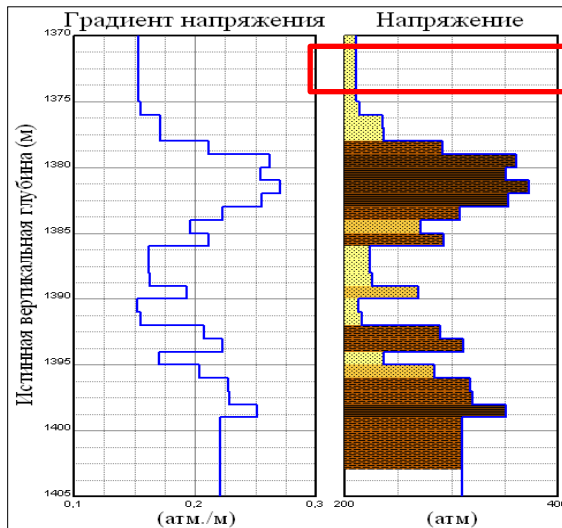
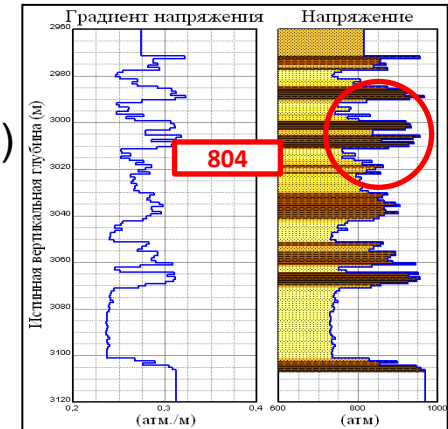
Д2



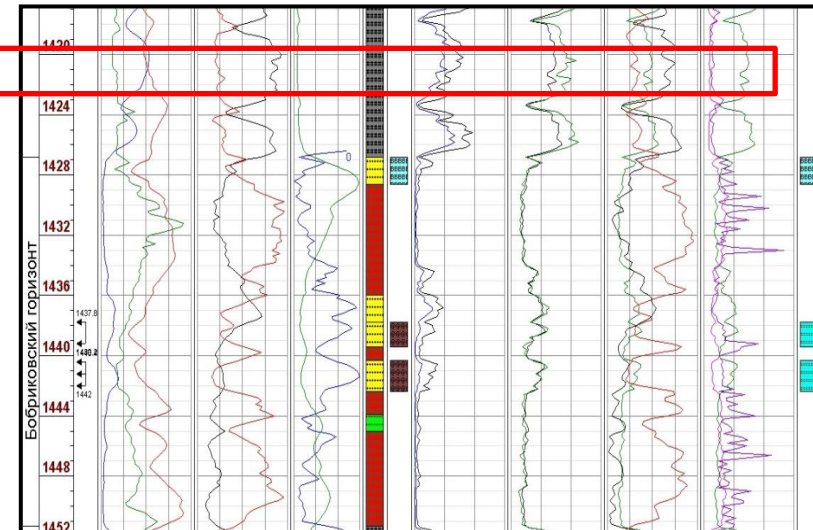
Необходимо анализировать весь разрез
(Whole well cross-section must be analyzed)



Д2+Д3

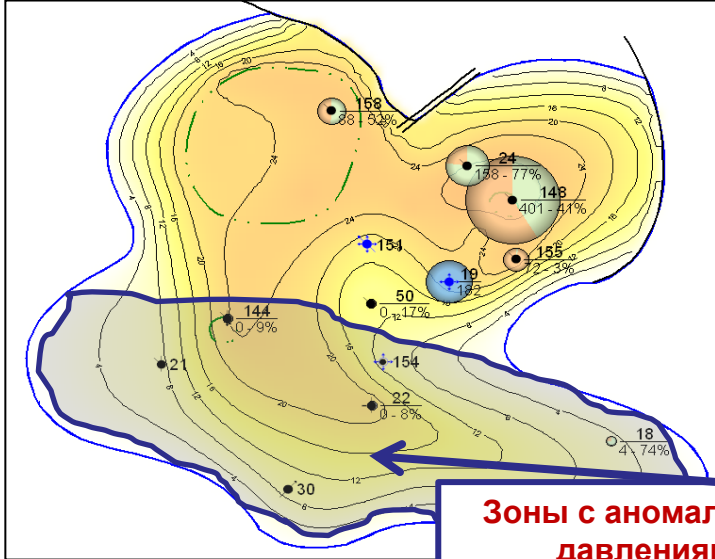


Необходимо ввести поправку «на карбонаты»
(Limestone layers must be taken into account)



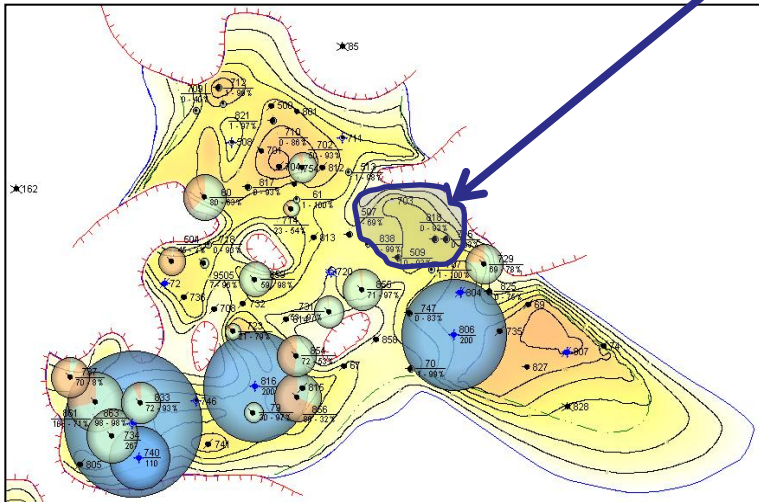
Определение зон с аномально высокими давлениями разрыва (Fracture pressure anomalous zone estimation)

Карта текущих отборов З-Коммунарского м-ния - Чаганский купол
(Current production map of Z-Kommunarskoe field - Chaganskii Kupol)



Зоны с аномально высокими давлениям разрыва
(Anomalous zone of formation fraction pressure)

Карта текущих отборов Ку...
(Current production map of ...)



Геомеханическая модель (2D)
(Geomechanical model 2D)



Позволяет **заранее** определять объекты с аномально высокими напряжениями - более 700 атм
(Allows **priori** estimation of formations with high fracture pressure - more than 700 atm)



Управление флотом ГРП
(Frac fleet control)

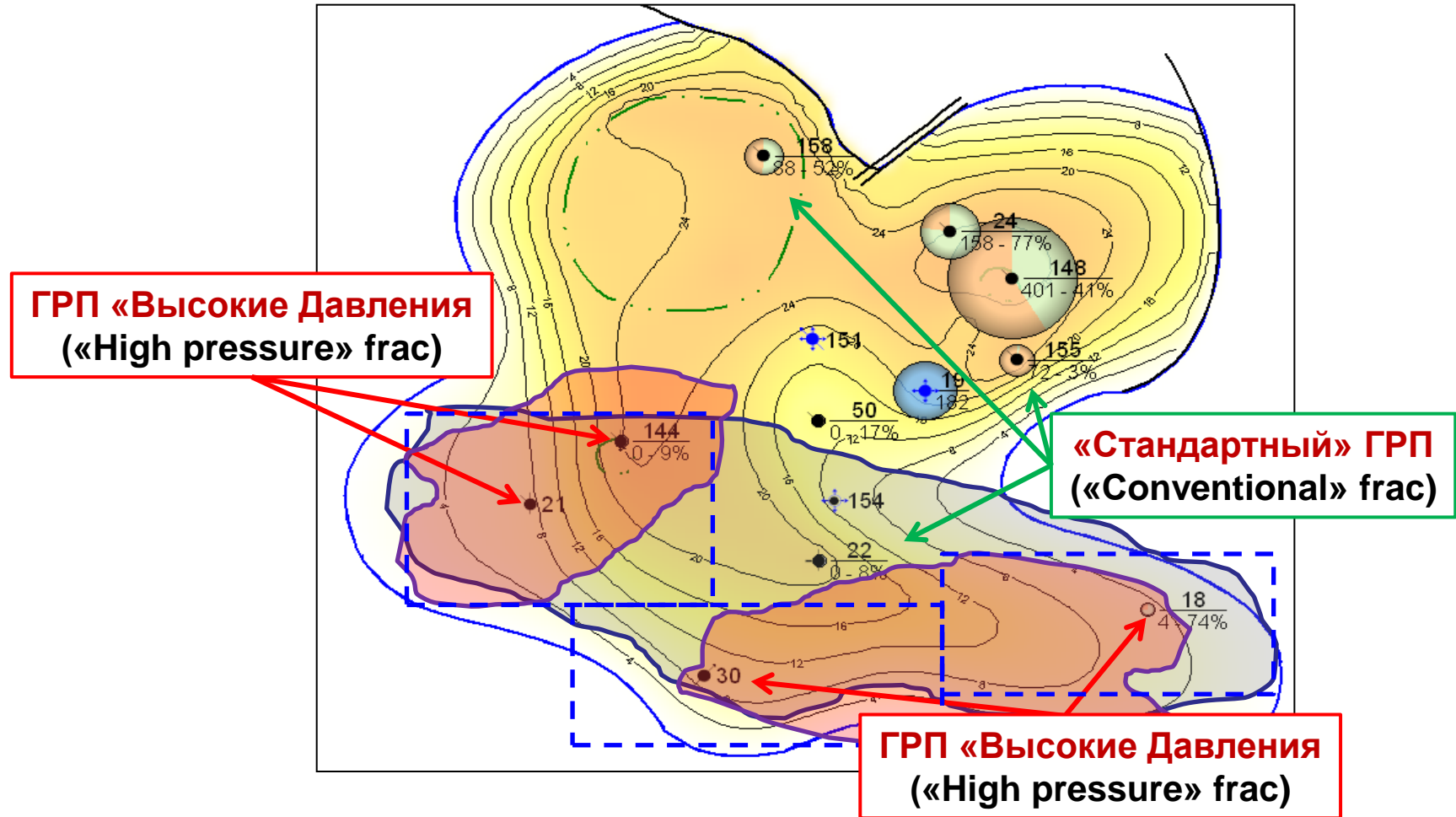




Снижение количества отскоков + затрат
(Reduction of failure works + costs)

1 «подход» = 1 Мини-ГРП
(1 «attempt» = 1 Data-Frac)

Определение зон с аномально высокими давлениями разрыва (Fracture pressure anomalous zone estimation)

Карта текущих отборов 3-Коммунарского м-ния - Чаганский купол
(Current production map of Z-Kommunarskoe field - Chaganskii Kupol)



-  - Зоны с аномально высокими давлениями разрыва (Fracture pressure anomalous zones)
-  - Зоны с аномально высокими давлениями разрыва после 3D сейсмики (Fracture pressure anomalous zones after 3D seismic)

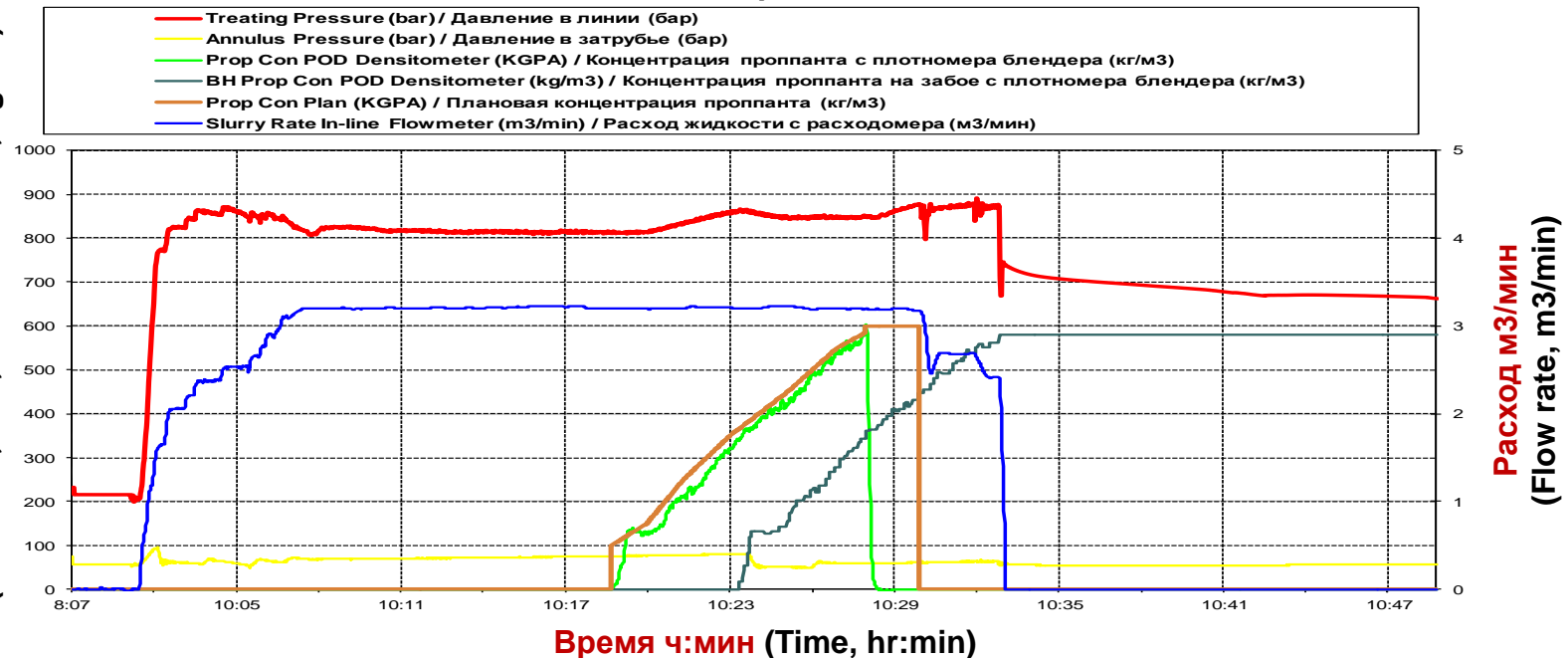
Фактическое выполнение проекта (Actual accomplishment of the project)

Основные показатели (Main aspects)

Количество выполненных операций ГРП ВД, шт (Number of «high pressure» frac operations)	35
Средняя M_p на 1 операцию, тонн (Average proppant mass for 1 frac, tons)	25
Среднее давление закачки ГРП, атм (Average surface pressure, atm)	650
Среднее давления закрытия трещины ГРП на забое, атм (Average fracture closure pressure ВН, atm)	620
Средний J_d (Average J_d)	0.33
Средний прирост дебита нефти, т/сут (Average increment of oil rate, ton/day)	35
Накопленная добыча нефти за 2012-2014гг., тыс. тонн (Cumulative oil production for 2012-2014, M tons)	170

Западно-Коммунарское пласт Д3
Отчёт по Обработке ГРП

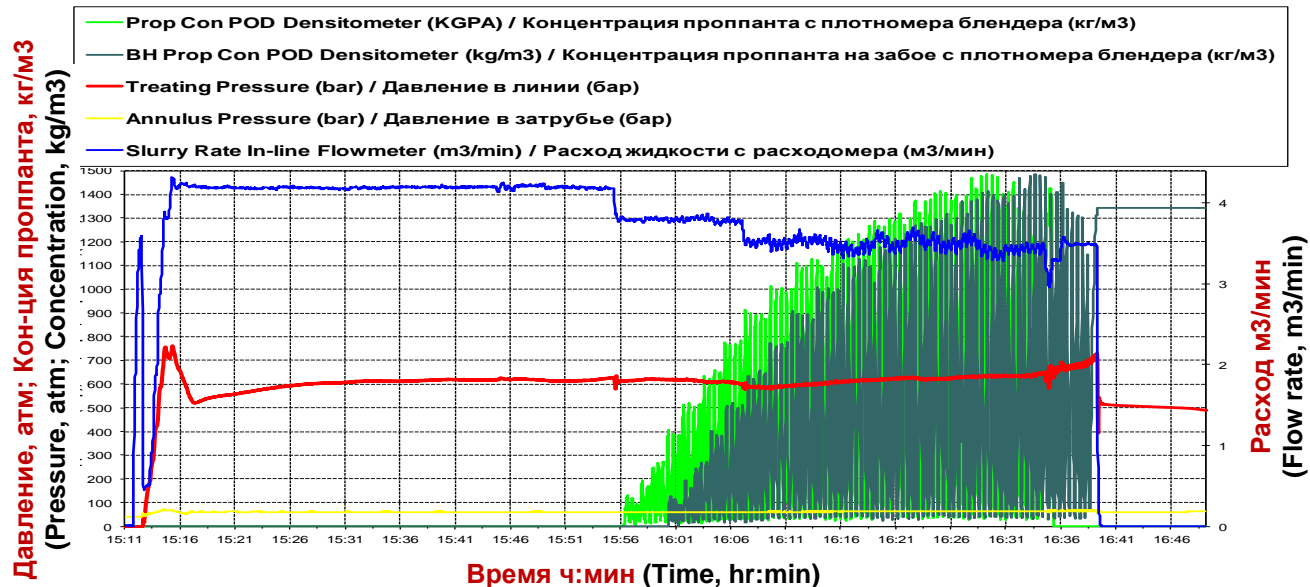
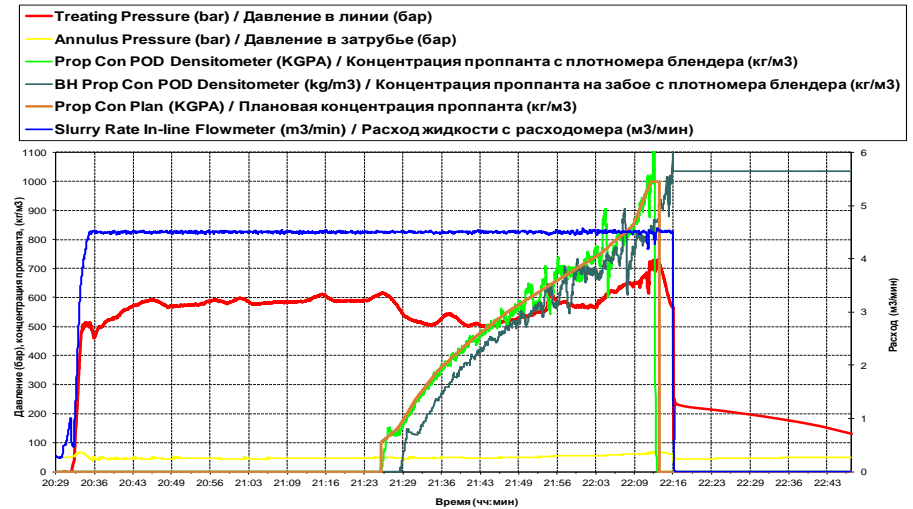
Давление, атм; Кон-ция проппанта, кг/м³
(Pressure, atm; Concentration, kg/m³)



Первый 100-тонный ГРП и ГРП ВД с созданием высокопроводящих каналов (First 100 tons Frac and «High pressure» frac with high conductivity channels)

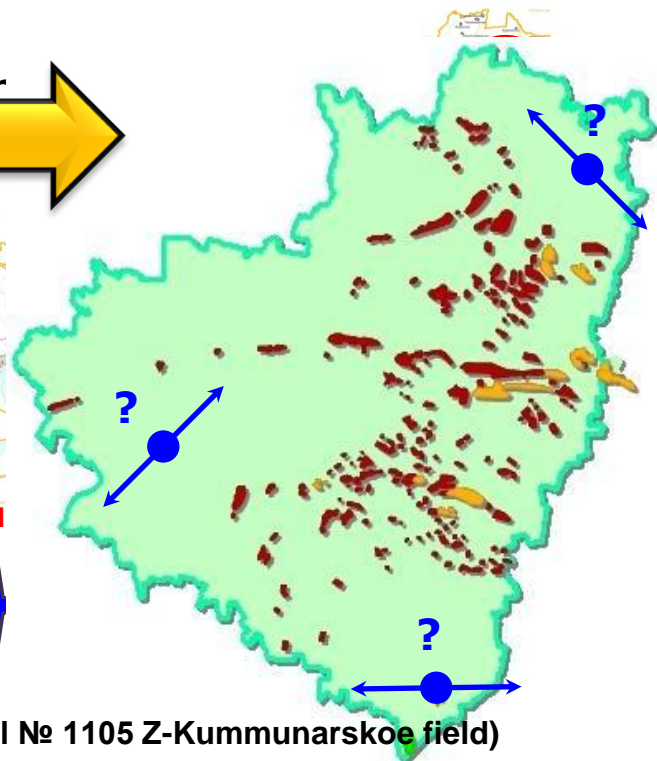
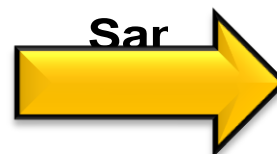
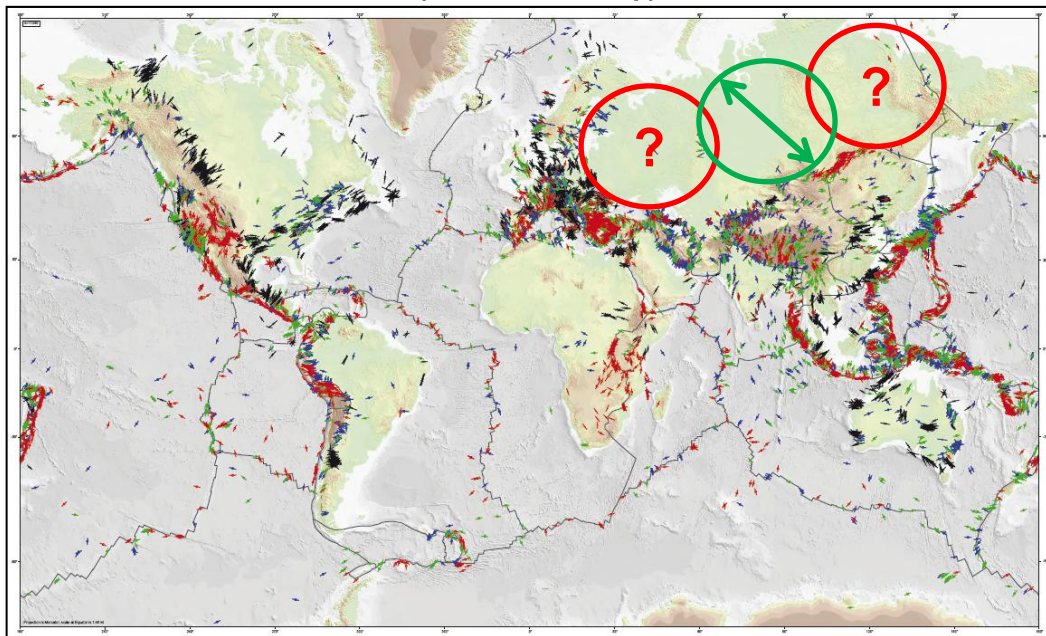
28 июня 2014 года скважина №984

Кулешовского месторождения.
Успешно закачан первый 100-тонный ГРП в Волго-Уральском регионе.

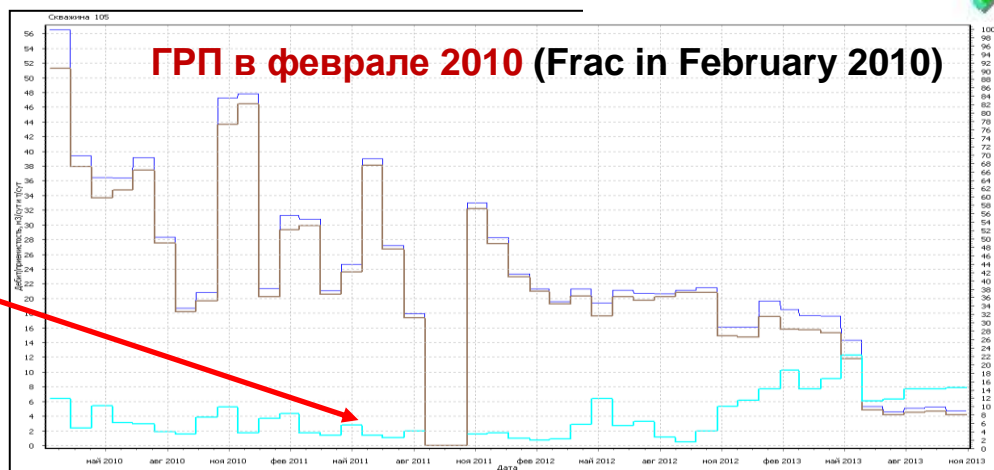
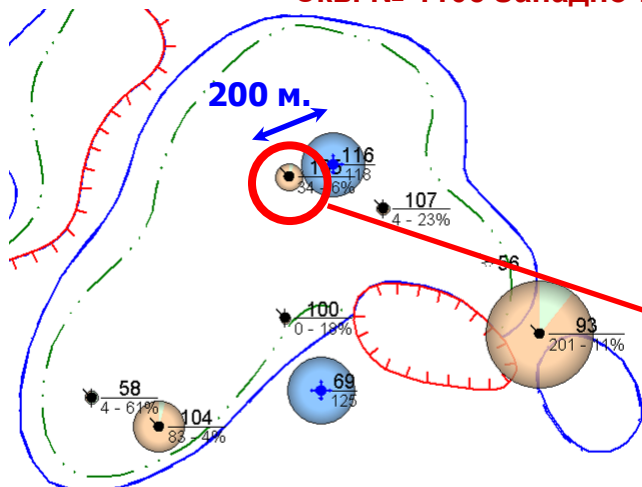


Определение азимута направления трещины (Estimation of fracture direction azimuth)

Распределение максимального горизонтального напряжения в мире (World stress map)



Скв. № 1105 Западно-Коммунарского месторождения (Well № 1105 Z-Kummunarskoe field)



Перспективы применения геомеханических моделей (Geomechanical modeling application prospects)

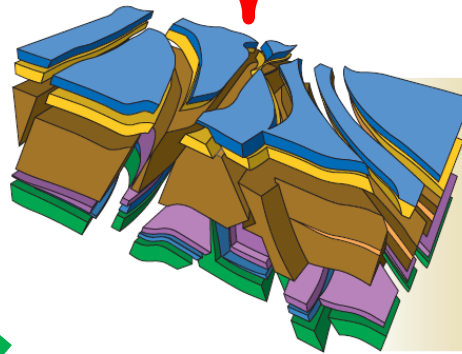
Геомеханическая модель (2D)
(*Geomechanical model 2D*)



Направление трещин ГРП
(*Fracture direction*)

Эксплуатация (ГТМ) (*Field exploitation*)

- ✓ Оптимизация дизайнов ГРП (Frac design optimization);
- ✓ Предотвращение прорывов трещин ГРП (Fracture breakthrough prevention);
- ✓ Планирование проведения ГРП (с учетом направления трещин) (Fracturing design according to stress direction);
- ✓ Прогнозирование зон с аномально высокими напряжениями. (Predicting of formation fracture pressure anomalous zone)



Бурение (*Drilling*)

- ✓ Оптимизация подбора буровых растворов для предотвращения аварий и минимизации загрязнения пластов (Optimization of drilling mud for formation damage prevention);
- ✓ Планирование наклонно-направленных скважин и ЗБС (зарезка бокового ствола) с учетом направления трещин ГРП (Horizontal wells and side-tracking planning)

Геомеханическая модель 3D
(*Geomechanical model 3D*)

Разработка месторождений (*Field development*)

- ✓ Планирование сеток скважин (Well pattern planning);
- ✓ Планирование мероприятий ППД с учетом направления трещин ГРП и авто-ГРП (Waterflooding planning considering fracture direction and auto-Frac);
- ✓ Вовлечение в разработку ранее экономически нерентабельных месторождений (Economically unprofitable fields development).

Выводы (Summary)

- Построена карта направлений распространения трещин ГРП на месторождениях Самарской области. Преимущественно Северо-Западное Юго-Восточное направление для девона.
(The stress (fracture direction) map was build for Samara region fields. The main stress has North-West South-East direction for Devon)
- Разработаны и внедрены рекомендации для бурения и заканчивания наклонно-направленных скважин и ЗБС (зарезка бокового ствола) в ОАО «Самаранефтегаз» с последующем проведением ГРП.
(Horizontal wells and side-tracking drilling recommendations were developed and implemented in OJSC «Samaraneftegaz»)
- Впервые для ОАО «Самаранефтегаз» построены геомеханические модели.
(The first geomechanical models were build for OJSC «Samaraneftegaz» fields)
- Определены зоны с аномально высокими напряжениями горных пород.
(Formation fracture pressure anomalous zones were estimated)
- На текущий момент проведено 35 операций ГРП на коллекторах с высокими давлениями разрыва. Средний прирост по нефти = 35 т/сут.
(35 fracs were done on formations with high fracturing pressure. The average increment of oil rate = 35 tons/day)
- Планируется выполнение 30 операций ГРП на коллекторах с высокими давлениями разрыва в 2015-2016 гг.
(Planning of 30 fracs for high treatment pressure formations in 2014-2015)
- Вовлечение в разработку ранее экономически неэффективных месторождений в ОАО «Самаранефтегаз».
(Economically unprofitable fields development implication)

Благодарность (Acknowledgement)

Ситдииков Сулейман

Никитин Алексей

Саляев Вадим

Парфёнов Алексей

Sitdikov Suleyman

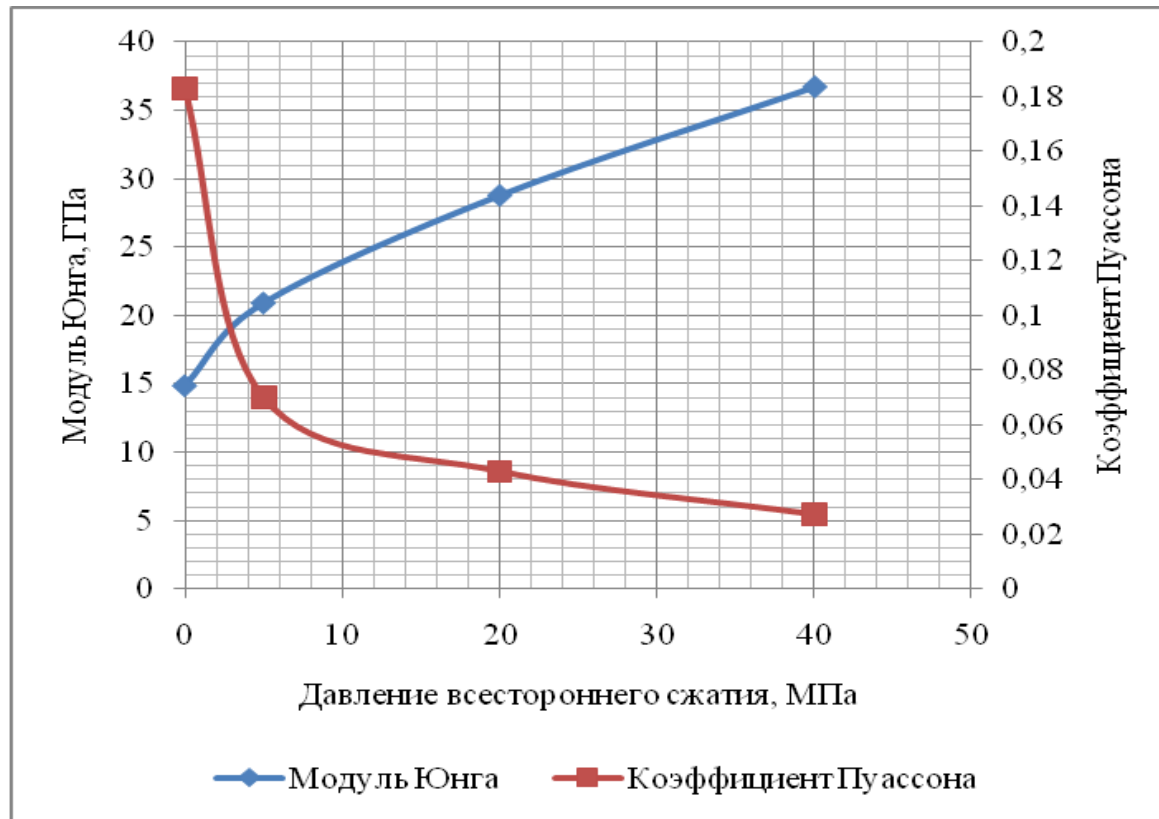
Nikitin Aleksey

Salyaev Vadim

Parfenov Aleksey

Вопросы?
Any questions?

Влияние давления обжима на Модуль Юнга и коэффициент Пуассона (Overburden stress influence on Young's modulus and Poisson's ratio)



Матчинг мини-ГРП на скважине № 798 3-Коммунарское м-ния (Well 798 Z-K field Data-frac matching)

Параметры для матчинга:

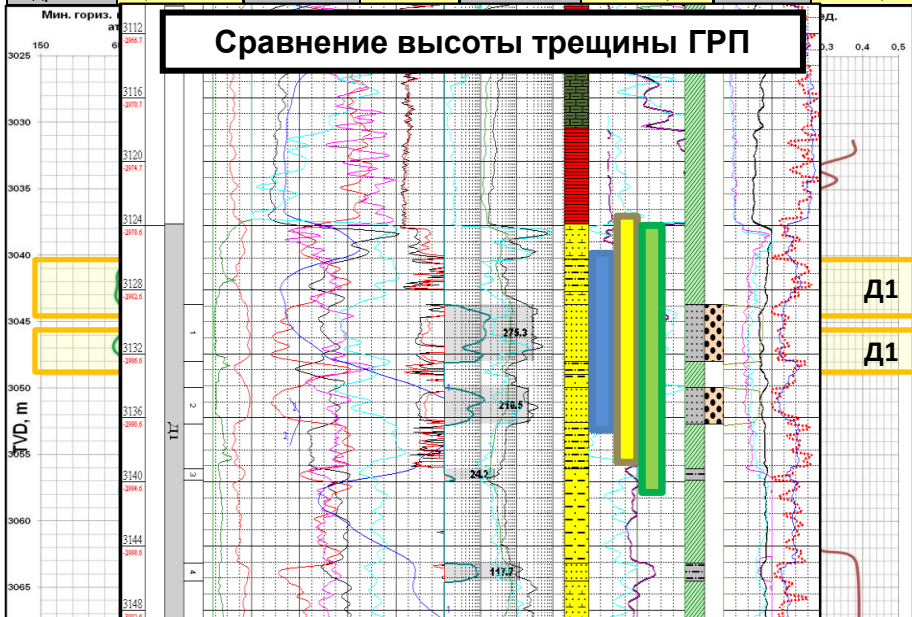
- Время закрытия 1,02 мин;
- ISIP_{поверх} = 428 атм;
- P_{закр} поверх = 601 атм;
- P_{нет} поверх = 121 атм;
- Эфф-ть = 8%.

Коефф. утечек	
a	0,285
b	0,1
c	0



Геомеханика							
Градиенты		Тектоника	352	Коефф. Пуассона		Коефф. трещин-сти	
Overburden	0,252 атм/м			глины	0,42	глины	1 100,00
Гидростат.	0,101 атм/м	песчаник	0,150	песчаник	900,00		

Сравнение высоты трещины ГРП



Модель	Высота трещины, м (MD)		
	Верх	Низ	Общая
ГИС Шлюмберже	3125,5	3137,0	11,5
RN Mech Prop	3124,5	3138,6	14,1
Катконекть	3124,7	3140,7	16,0

