



Прогноз геомеханических свойств пород с использованием геостатистического моделирования сейсмических данных

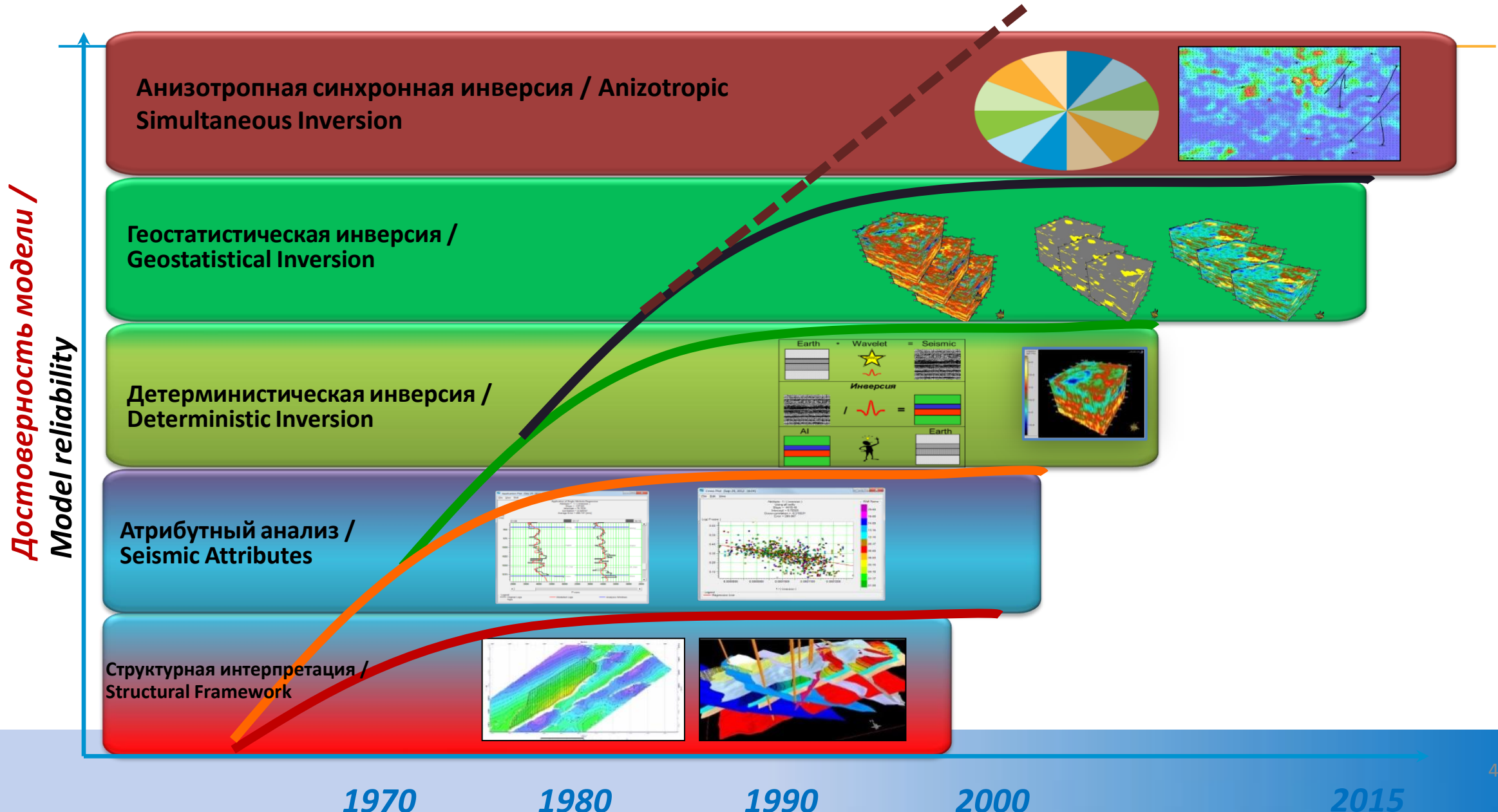
Сергей Федотов, CGG

Identifying geomechanical parameters using geostatistical modelling controlled by seismic data

Sergey Fedotov, CGG

1. Современные технологии / Modern technologies
2. Почему геостатистика? / Why geostatistics?
3. Геостатистическое моделирование, управляемое сейсмическими данными/ Seismic driven geostatistical modeling
4. Геомеханика – новая специальность сейсморазведки / Geomechanics as new profession of seismic
5. 1D геомеханическая модель / 1D geomechanical model
6. 3D геомеханическая модель / 3D geomechanical model
7. Геостатистика – для геомеханики / Geostatistics for geomechanics
8. Полная 3D геомеханическая модель / Full 3D geomechanical model
9. Выводы / Conclusions

Современные технологии



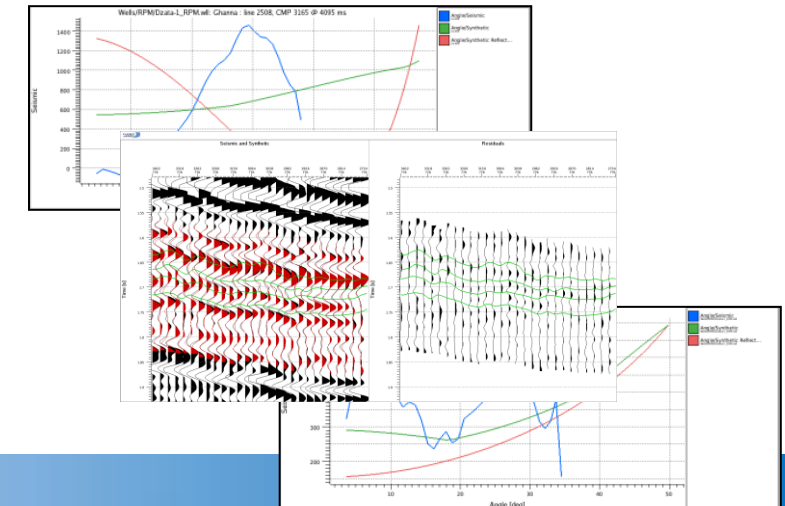
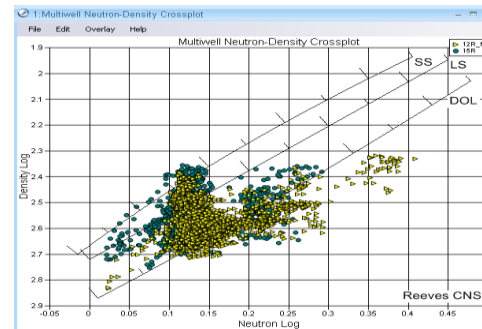
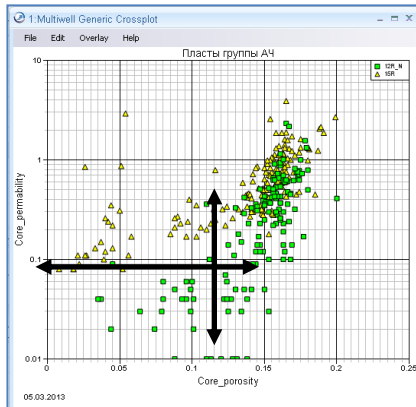
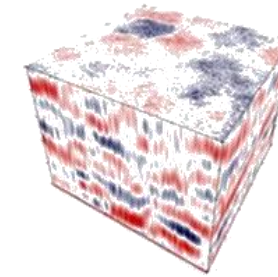
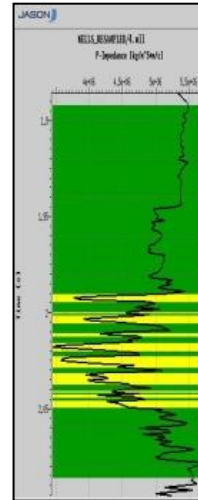
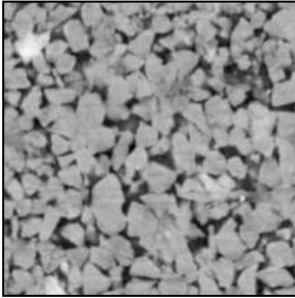
Почему геостатистика?
Why geostatistics?

- Отсутствие единой метрики / Lack of common metrics



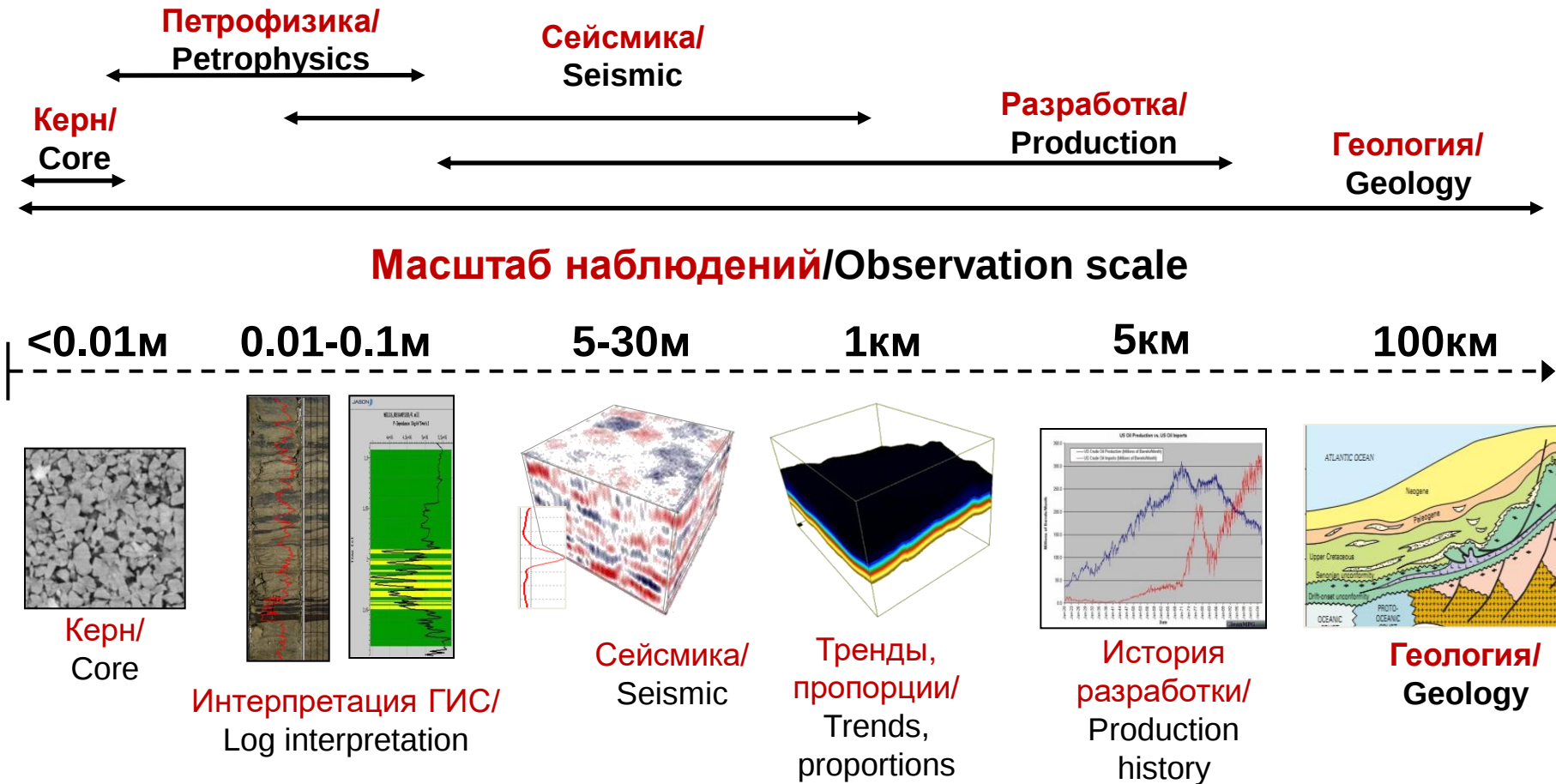
Совокупность неопределенностей

A complex of uncertainties

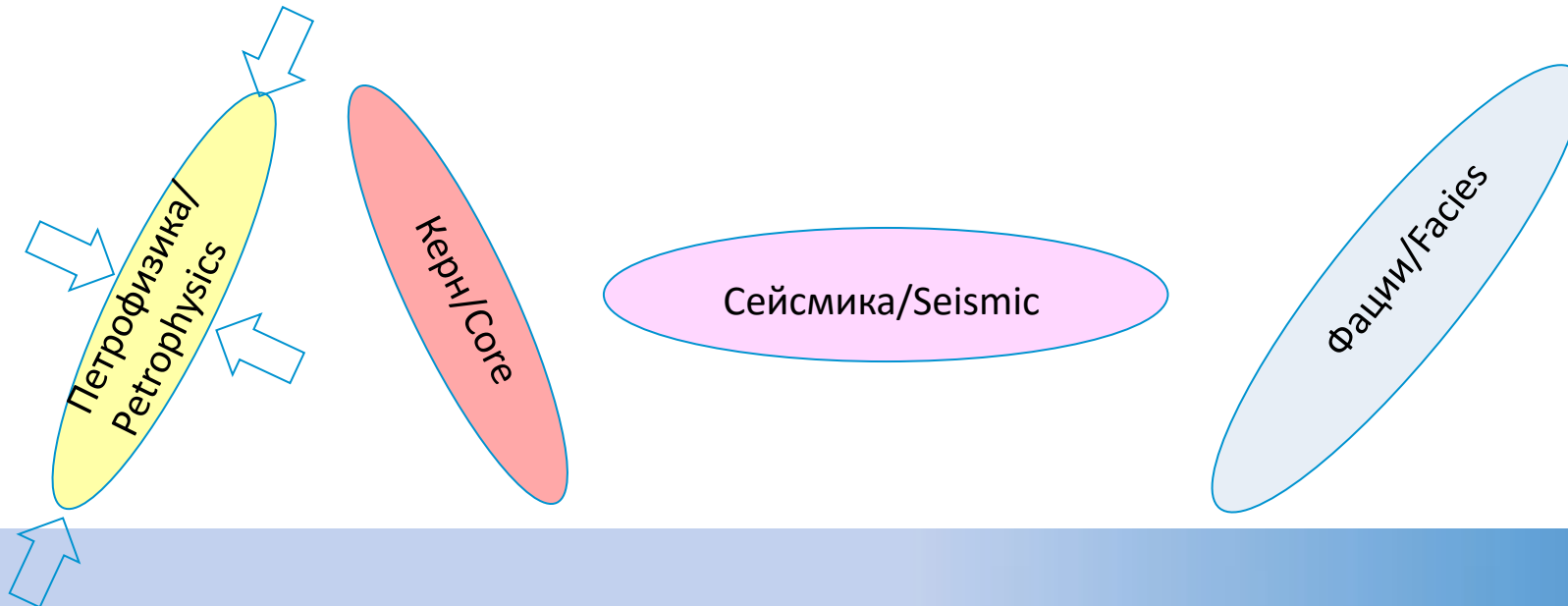


Совокупность неопределенностей

A complex of uncertainties



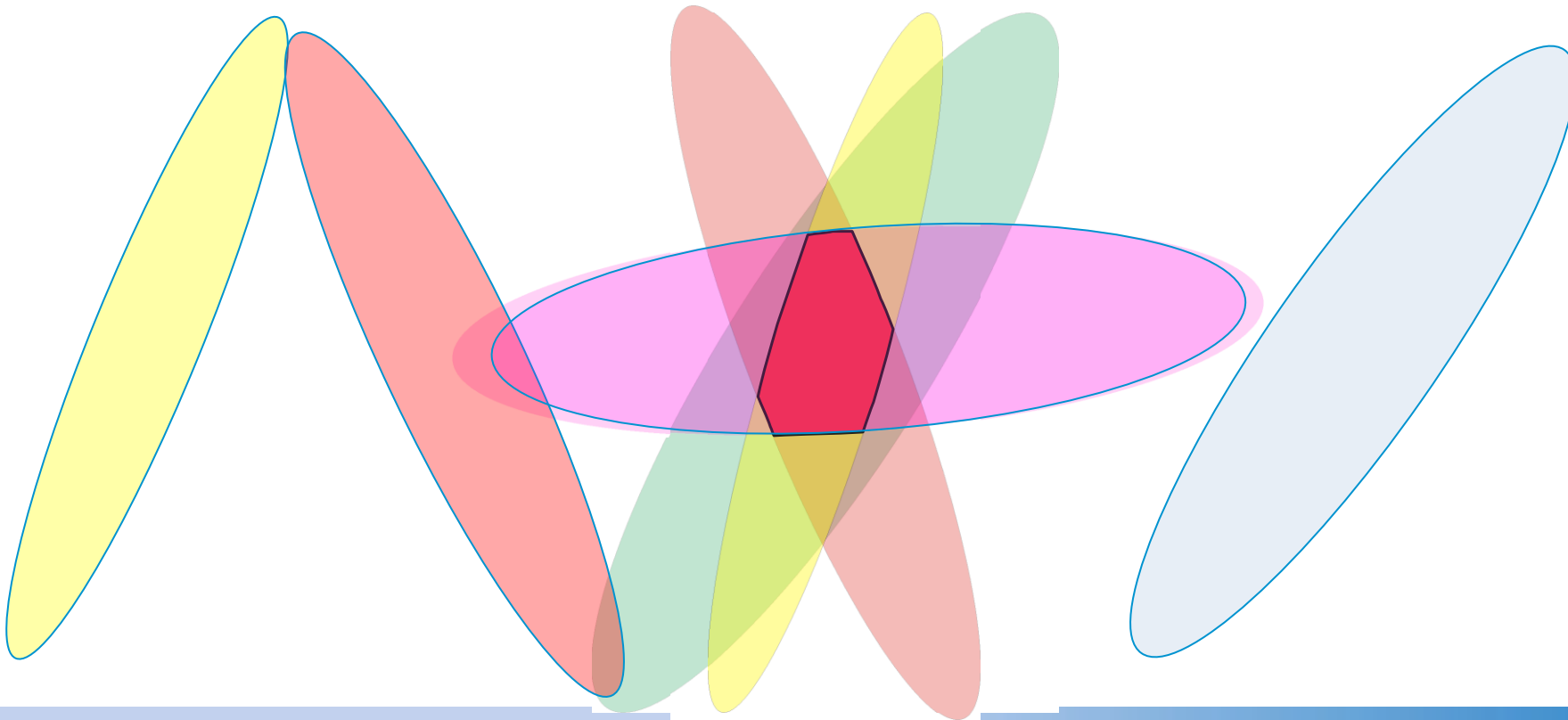
- Уменьшение неопределенности в рамках отдельных методов / Reducing uncertainties within different disciplines
 - ❖ Разработка более совершенных методов наблюдений / Development of better observation techniques
 - ❖ Улучшение алгоритмов обработки и интерпретации / Enhancement of processing and interpretation algorithms



Возможные пути снижения неопределенности

Possible ways to reduce uncertainties

- ***Интеграция всей имеющейся на месторождении информации для ограничения неопределенности в получаемом решении/
Integration of all field data to reduce uncertainty in the solution***



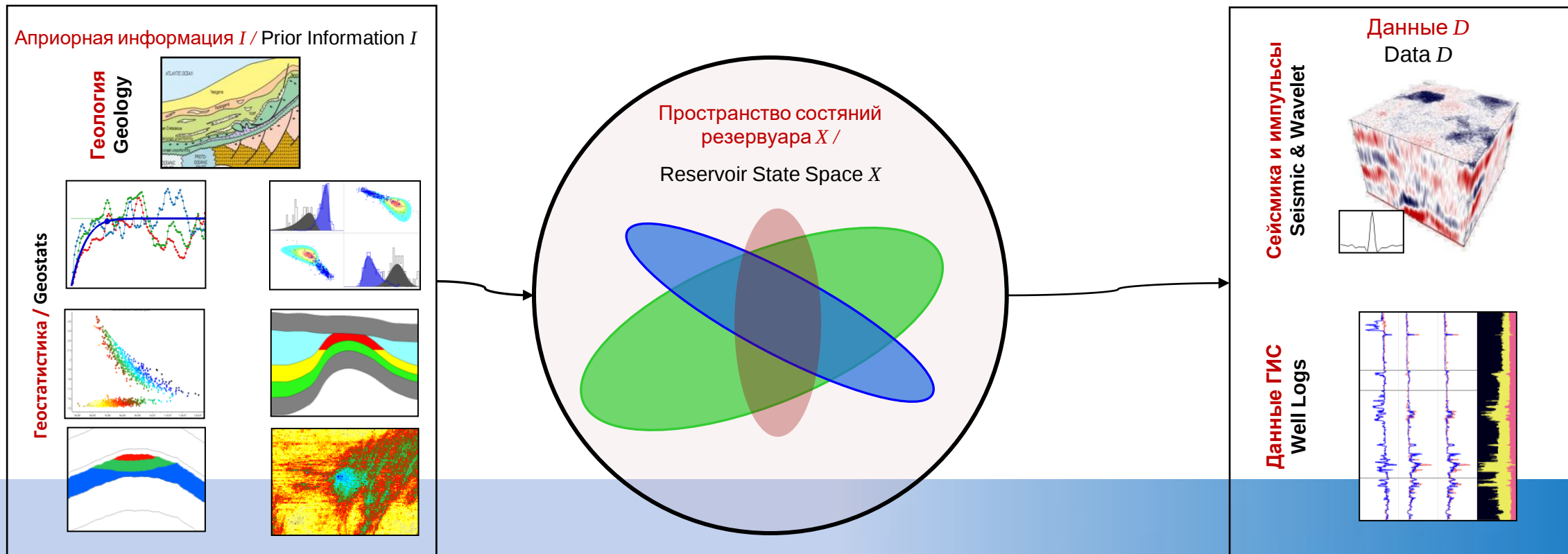
Геостатистическое моделирование,
управляемое сейсмическими данными
Seismic driven geostatistical modeling

- Признать, что входная информация (измерения и геологические знания) содержат неопределенности / Recognize that input information (measurements, geology) contains uncertainties.
- Сформулировать проблему в терминах вероятности и решить ее на основе лучших статистических методов / Phrase the problem in probabilistic terms and solve it using advanced statistical techniques.
- Построить множественные реализации, которые / Produce multiple realizations that:
 - Удовлетворяют всей входной информации / Honor all input information
 - Отражают множество источников неопределенности / Reflect the multiple sources of uncertainty
 - Дают возможность понять, что мы знаем и чего – не знаем о недрах / Give insight into what you know and what you don't know about the subsurface
- Три главных составляющих / Three major components:
 - Статистическое моделирование / Statistical Modeling
 - Байесовы вероятности / Bayesian Inference
 - Алгоритм Монте-Карло на основе цепи Маркова / Markov Chain Monte Carlo

Первая составляющая – статистическое моделирование

Component 1 – Statistical Modeling

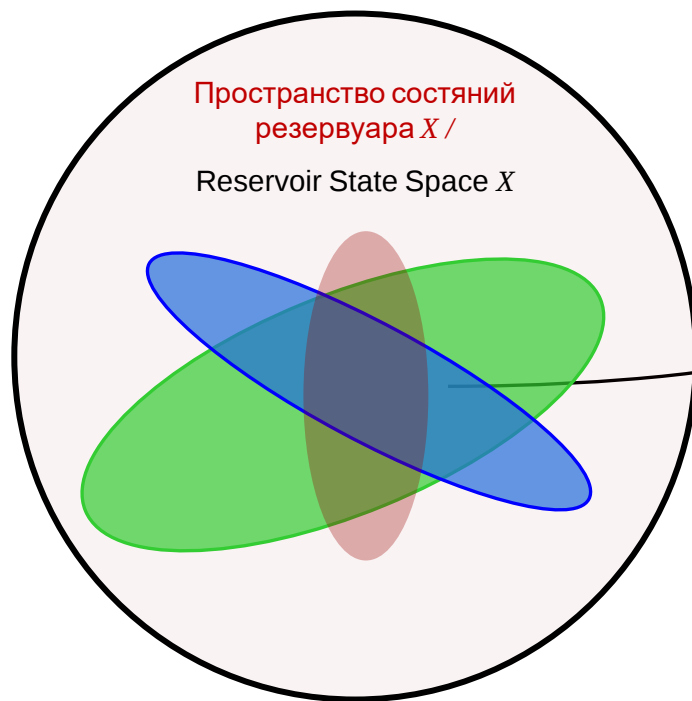
- Тщательно определить функции плотности вероятности, ассоциированные с различными источниками данных / Determine carefully the probability density functions associated with input data sources.
- Каждый источник данных определяет некоторую «область неопределенности» / Each input data source defines an “uncertainty envelope”.
- Каждая из них представляет информацию из одного источника, но оставляет значительную неопределенность / Each on its own captures information from one data source but leaves a lot of ambiguity.



Вторая составляющая – принцип Байеса

Component 2 – Bayesian Inference

- Объединить эти функции плотности вероятности в «глобальную» функцию плотности вероятности, представляющую апостериорную ФПВ резервуара при заданных сейсмических данных и другой априорной информации / Merge these probability density functions into a “global” probability density function representing the posterior pdf of the reservoir given the seismic and prior information.
- Пересечение всех «областей неопределенности» является остаточной неопределенностью / The intersection of the “uncertainty envelopes” is the ambiguity left over.



Правило Байеса / Bayes' rule

$P(X|D, I) =$
Апостериорная ФПВ
Posterior pdf

Функция правдоподобия
Likelihood function

$\frac{P(D|X)P(X|I)}{P(D)}$ ← Априорная ФПВ
Prior pdf

↓ Нормализующая константа
Normalisation constant

$$= \sum_X P(D|X)P(X)$$

“Апостериорная ФПВ резервуара при имеющихся данных и априорной информации I пропорциональна функции правдоподобия данных для данного резервуара умноженной на ФПВ резервуара”

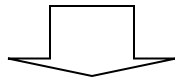
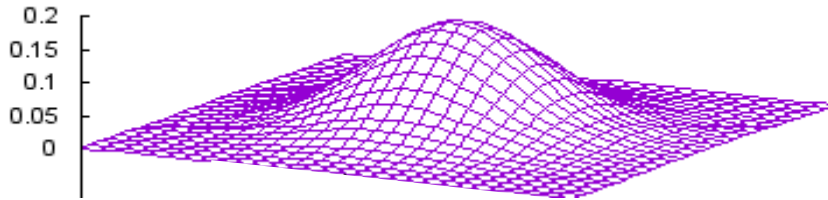
“The posterior pdf of the reservoir given the data D and the prior information I is proportional to the likelihood of the data given the reservoir, multiplied by the prior pdf of the reservoir”

Третья составляющая – метод Монте-Карло на основе цепи Маркова

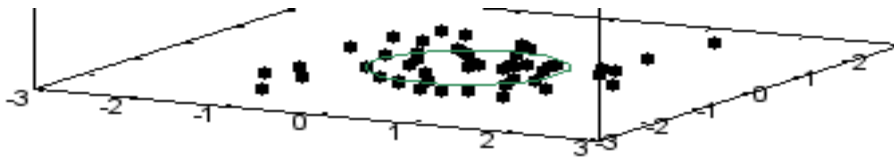
Component 3 – Markov Chain Monte Carlo

- Почему? Сложность решения проблемы байесовой вероятности заключается в исключительной сложности и многомерности апостериорной функции плотности вероятности / Why? The difficulty in solving the Bayesian Inference problem is that the posterior probability density function is extremely complex and multidimensional.

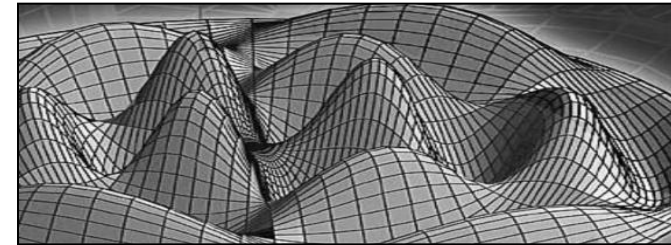
Выборку из простой ФВП
сделать легко / Sampling from
a simple pdf is easy



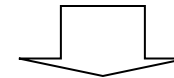
50 выборок из двумерной гауссовой ФПВ
50 samples from 2D Gaussian pdf



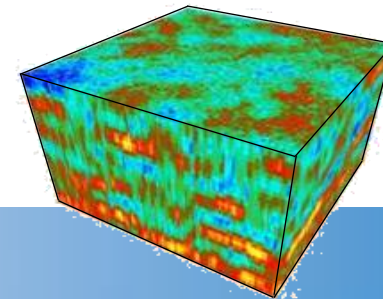
Однако совсем другое дело построить выборку из ФПВ, похожей
на эту / But what about sampling from a complex pdf like this?



P_{target}



Адаптированный алгоритм Монте-Карло на основе цепи Маркова
Customized Markov Chain Monte Carlo algorithm

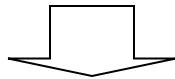
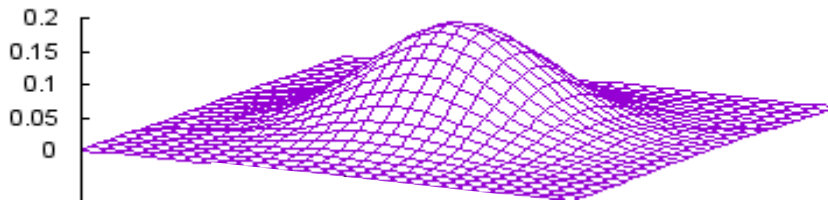


Третья составляющая – метод Монте-Карло на основе цепи Маркова

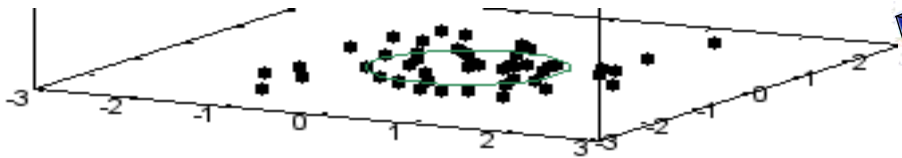
Component 3 – Markov Chain Monte Carlo

- Почему? Сложность решения проблемы байесовой вероятности заключается в исключительной сложности и многомерности апостериорной функции плотности вероятности / Why? The difficulty in solving the Bayesian Inference problem is that the posterior probability density function is extremely complex and multidimensional.

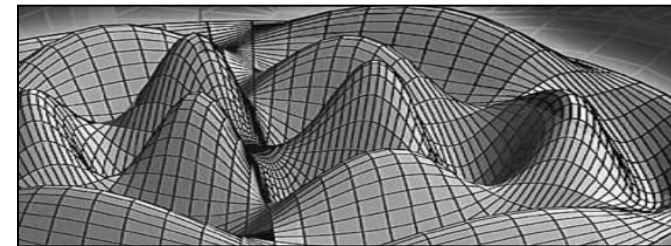
Выборку из простой ФВП
сделать легко / Sampling from
a simple pdf is easy



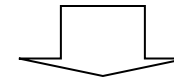
50 выборок из двумерной гауссовой ФВП
50 samples from 2D Gaussian pdf



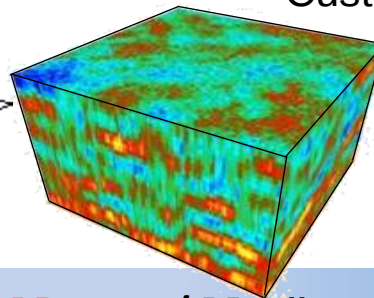
Однако совсем другое дело построить выборку из ФВП, похожей
на эту / But what about sampling from a complex pdf like this?



P_{target}



Адаптированный алгоритм Монте-Карло на основе цепи Маркова
Customized Markov Chain Monte Carlo algorithm



Определение нормализующей константы требует прямых
вычислений для всех возможных конфигураций резервуара
Computing normalization constant requires performing forward
calculations for all possible reservoir configurations

$$P(D) = \sum_{X \in \{X_1, \dots, X_{NM}\}} P(D|X)P(X)$$

M ячеек / M cells

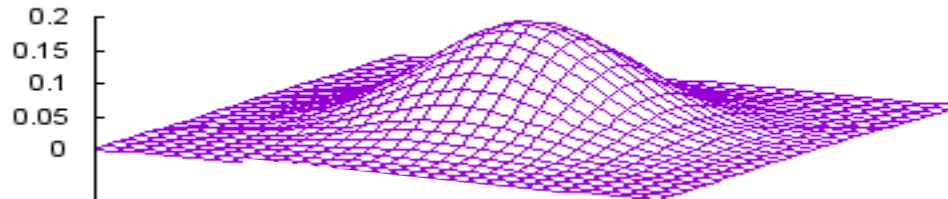
N возможных значений в каждой ячейке / N possible values each cell

Третья составляющая – метод Монте-Карло на основе цепи Маркова

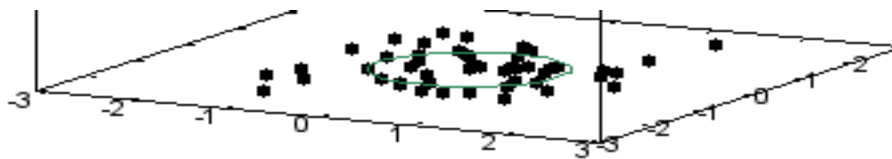
Component 3 – Markov Chain Monte Carlo

- Что это такое? / What is it?

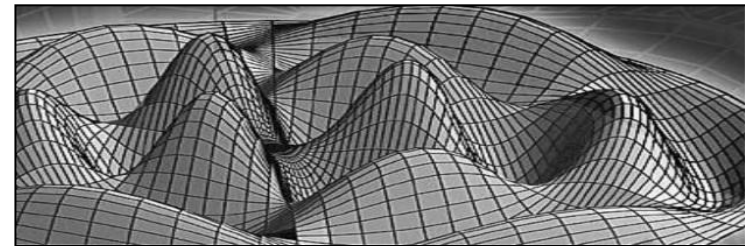
Симуляция Монте-Карло
Monte Carlo Simulation



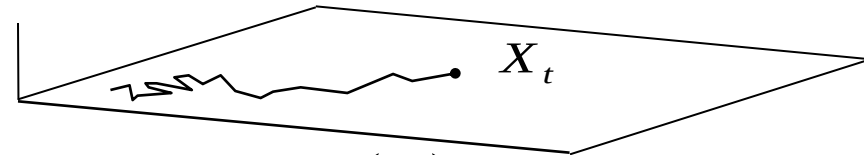
50 независимых выборок
50 Independent Samples



Симуляция Монте-Карло на основе цепи Маркова
Markov chain Monte Carlo Simulation



1 цепочка Маркова зависимых выборок
1 Markov Chain of Dependent Samples



$$X_0 \sim P_0(X)$$

$$\downarrow$$
$$X_t \sim P(X|X_{t-1}) \quad t = 1, 2, \dots$$

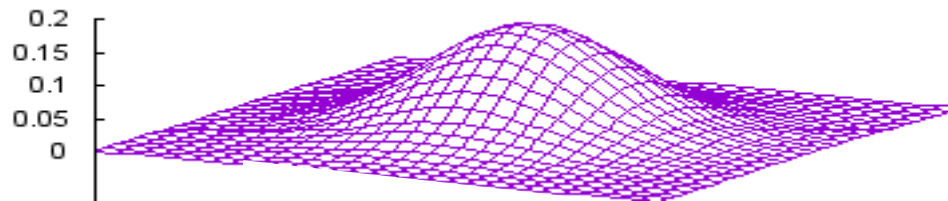
➡ for t large enough : $X_t \sim P_{\text{target}}$

Третья составляющая – метод Монте-Карло на основе цепи Маркова

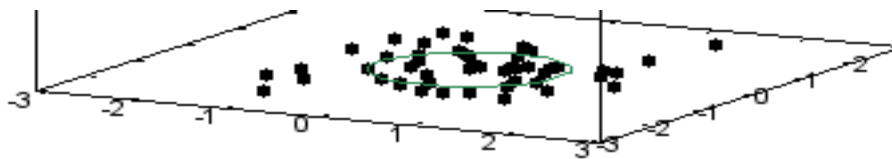
Component 3 – Markov Chain Monte Carlo

- Что это такое? / What is it?

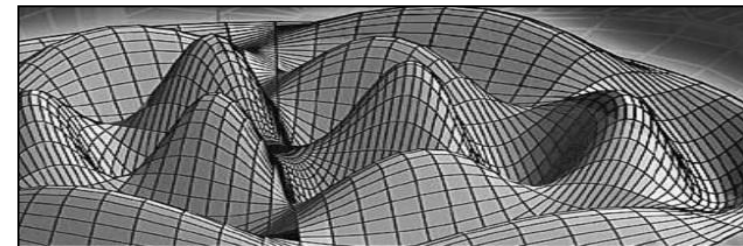
Симуляция Монте-Карло
Monte Carlo Simulation



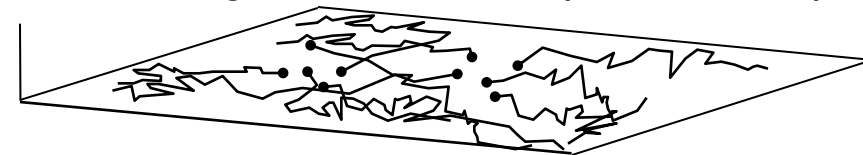
50 независимых выборок
50 Independent Samples



Симуляция Монте-Карло на основе цепи Маркова
Markov chain Monte Carlo Simulation



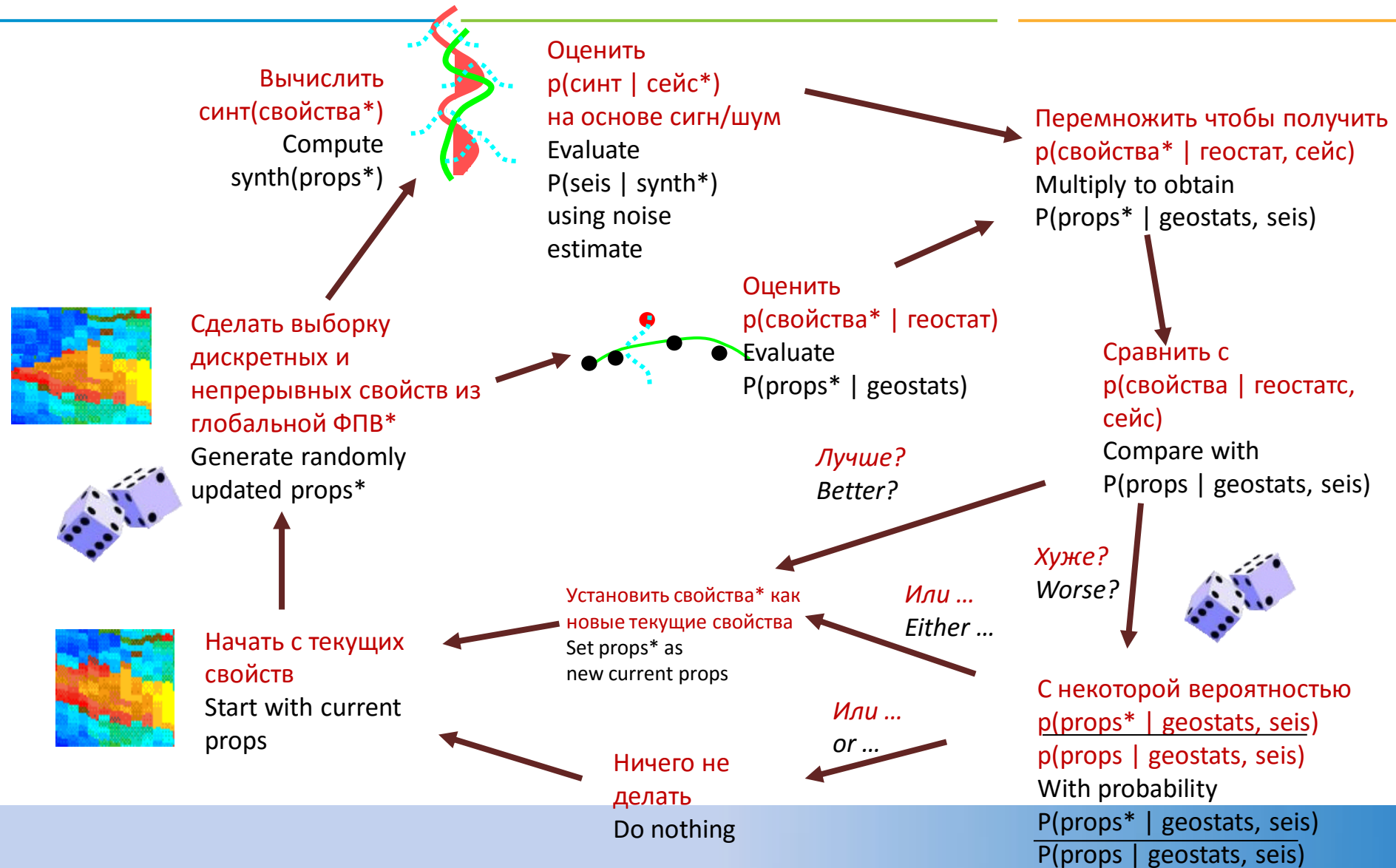
10 цепочек Маркова генерируют 10 независимых выборок
10 Markov chains generates 10 independent samples



$$\begin{aligned} X_0^1 &\rightarrow X_1^1 \rightarrow \dots \rightarrow X_t^1 \\ X_0^2 &\rightarrow X_1^2 \rightarrow \dots \rightarrow X_t^2 \\ &\vdots \\ X_0^{10} &\rightarrow X_1^{10} \rightarrow \dots \rightarrow X_t^{10} \end{aligned}$$

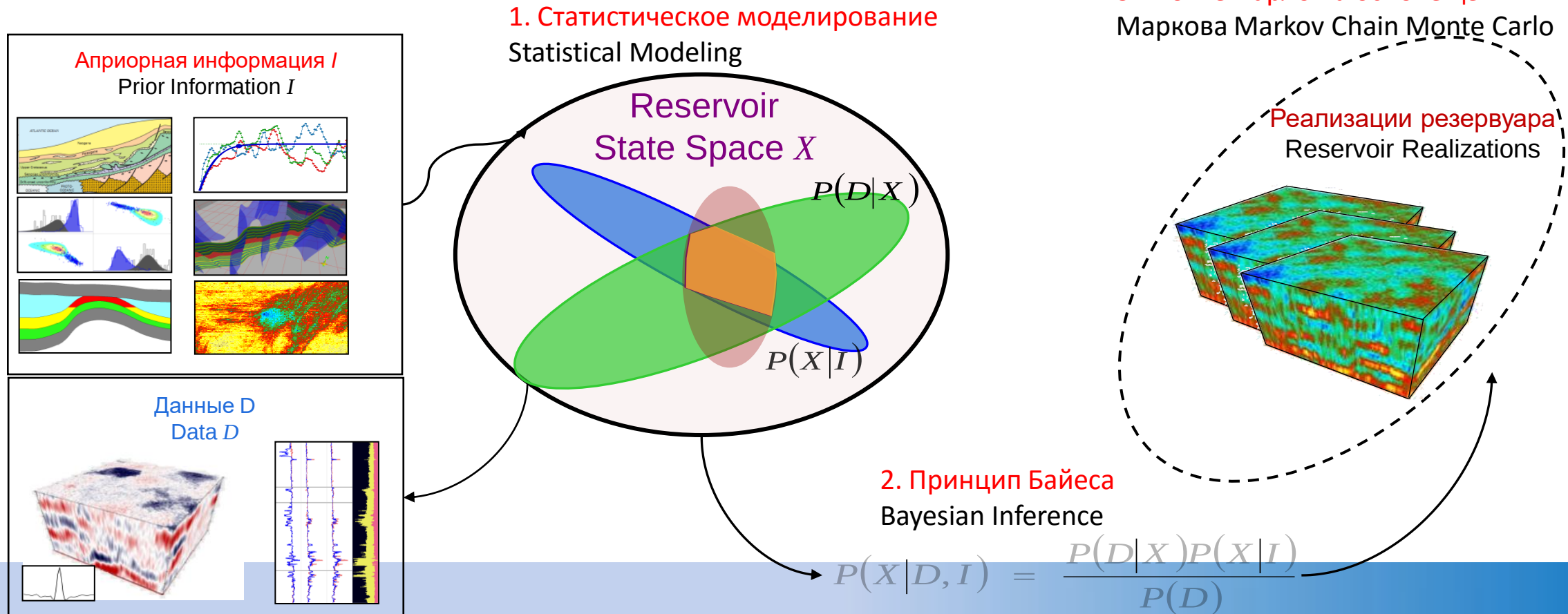
Упрощенная схема процесса моделирования

Simplified flowchart of the modeling process

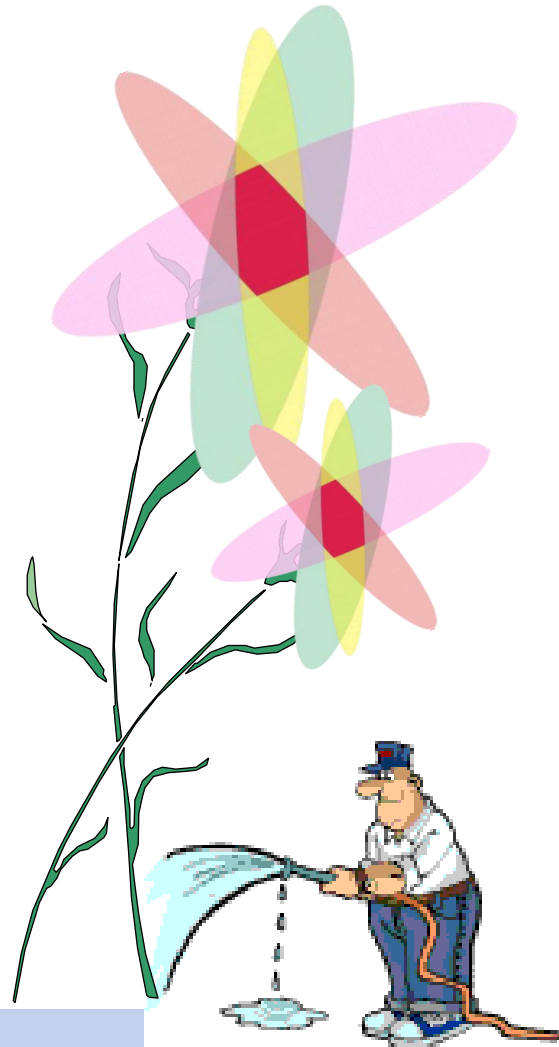


В итоге: Putting It All Together

- Комбинируя статистическое моделирование, принцип Байеса и метод Монте-Карло на основе цепи Маркова, мы получаем множественные детальные правдоподобные реализации резервуара, а также оценку соответствующей неопределенности / By combining Statistical Modeling, Bayesian Inference and MCMC, we get multiple plausible detailed realizations of the reservoir and insight into related uncertainty.



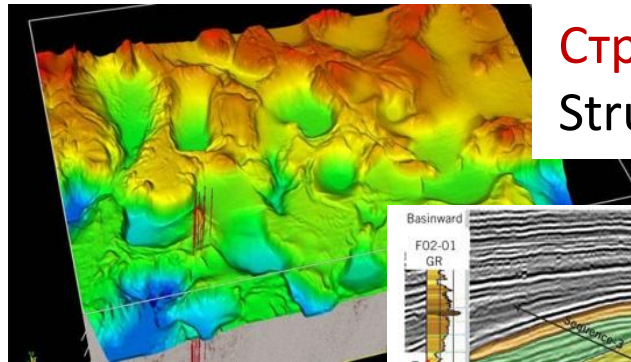
- **Высокая детальность** / Highly detailed
- **Подтверждаемость результатов бурением (в рамках оцененных неопределенностей)** / Proved by drilling (within estimated uncertainties)
- **Правильные ретроспектива и предсказание процессов разработки** / Good history matching along with excellent forecast capabilities



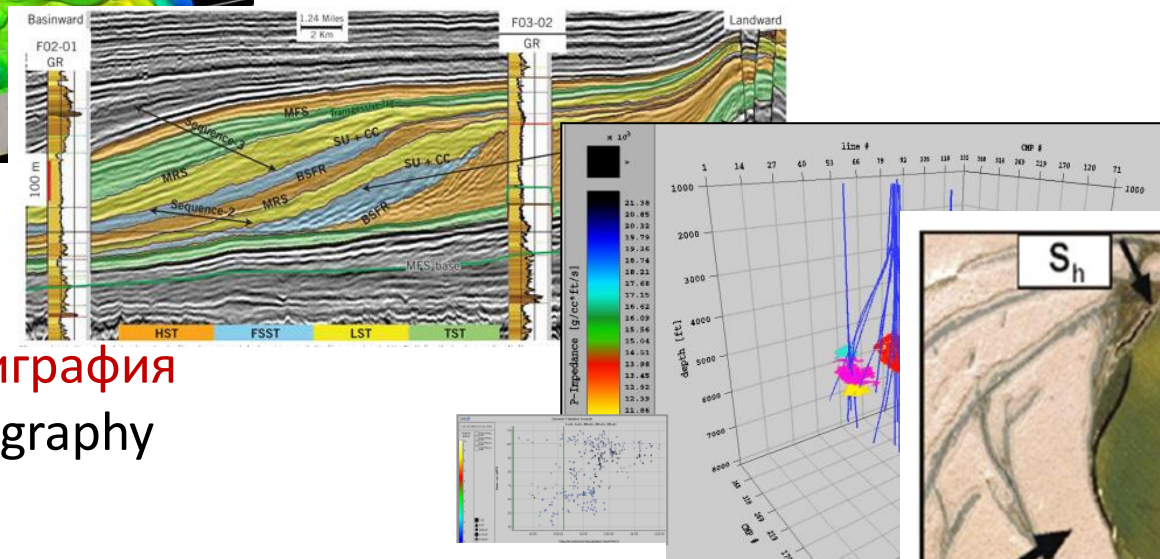
- **Наименьшая неопределенность** / Least possible uncertainty
- **Количественная оценка неопределенностей (в том числе в терминах вероятности)** / Quantitative uncertainty estimation (in terms of probability as well)

Геомеханика – новая специальность сейсморазведки

Geomechanics as new profession of seismic



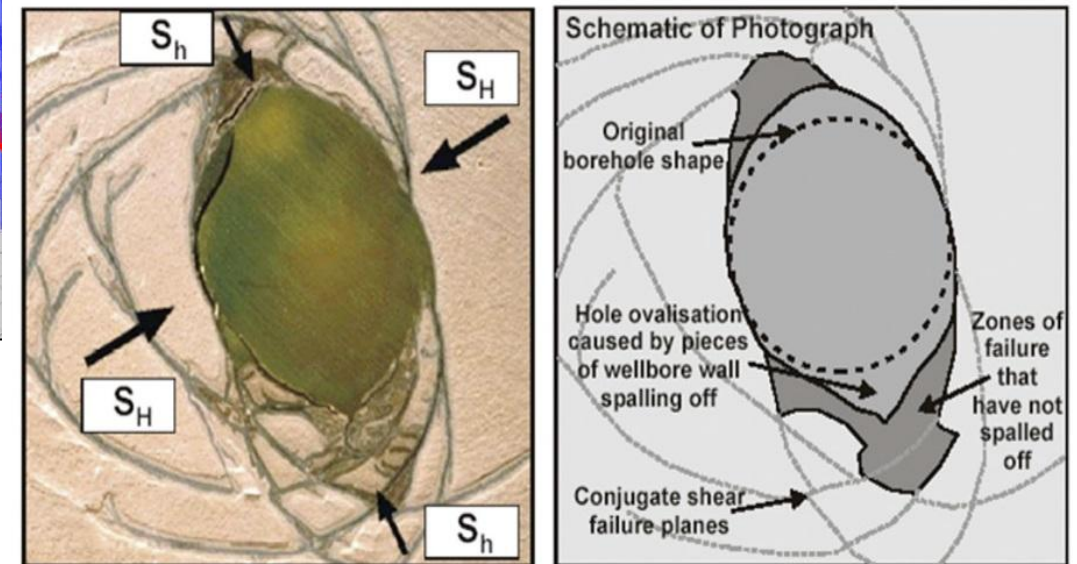
Структурный каркас
Structural Framework



Секвенс-стратиграфия
Sequence Stratigraphy

Описание резервуара
Reservoir Characterization

А теперь и геомеханика
Now Geomechanics

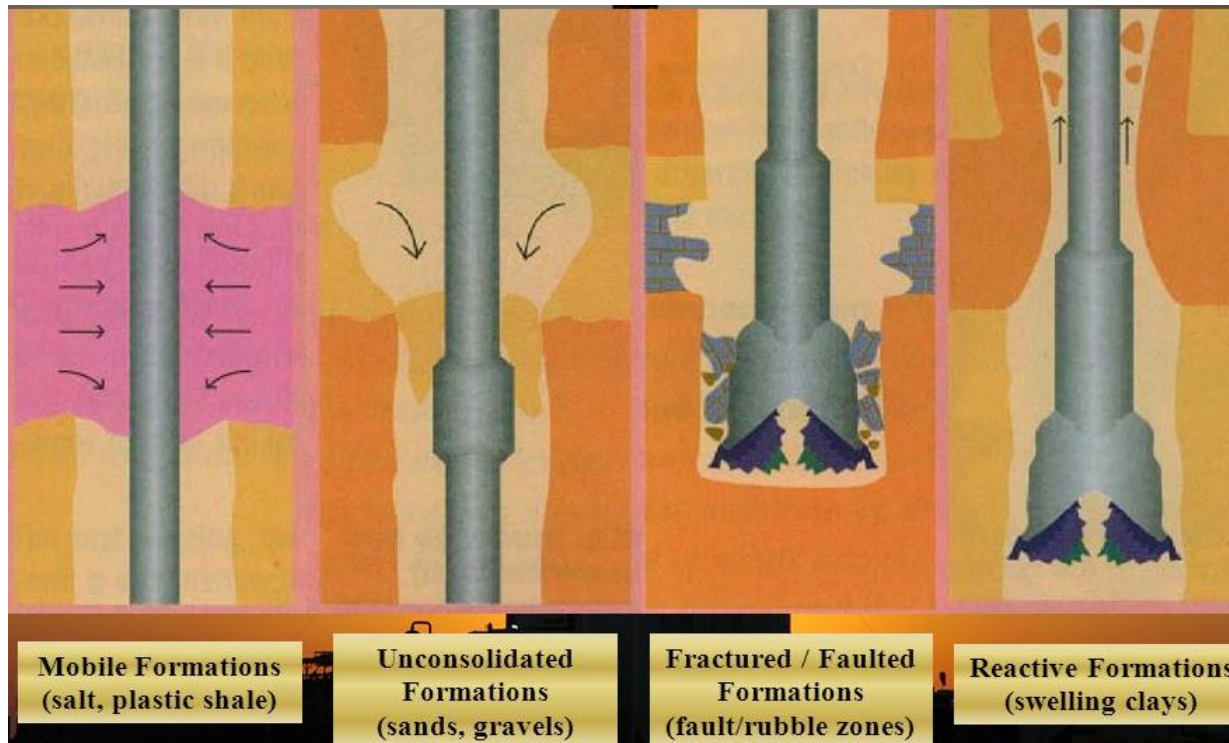


-
- При планировании бурения скважин / Well bore planning
 - прогноз возможных осложнений / forecast of complications during drilling
 - устойчивость ствола скважины /well bore stability

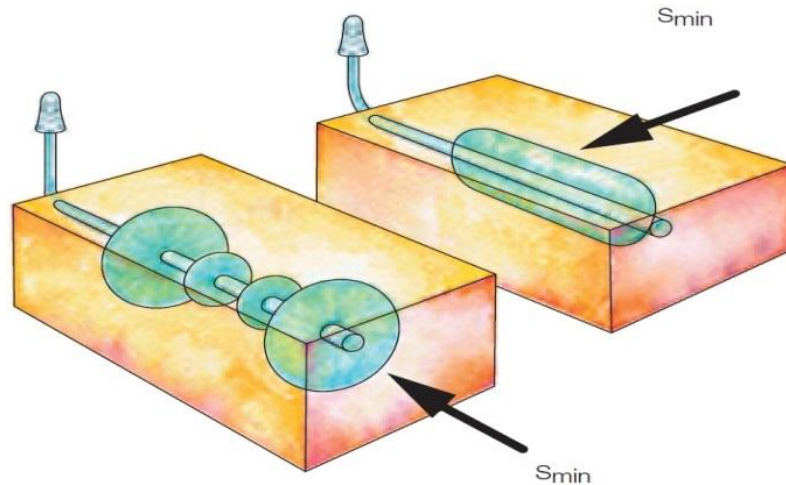
Осложнения при проводке скважин

Коллапс обсадной колонны / Casing collapse

Прихват инструмента / Drill bit stuck



- При планировании бурения скважин / Well bore planning
 - прогноз возможных осложнений / forecast of complications during drilling
 - устойчивость ствола скважины /well bore stability
- Для максимизации объема добычи / Maximizing production
 - эффективное выполнение гидроразрыва / hydraulic fracturing efficiency
 - правильная проводка ствола скважины как для целей наилучшего дренажа, так и для целей эффективного заводнения / right well bore trajectory either for drainage or flooding

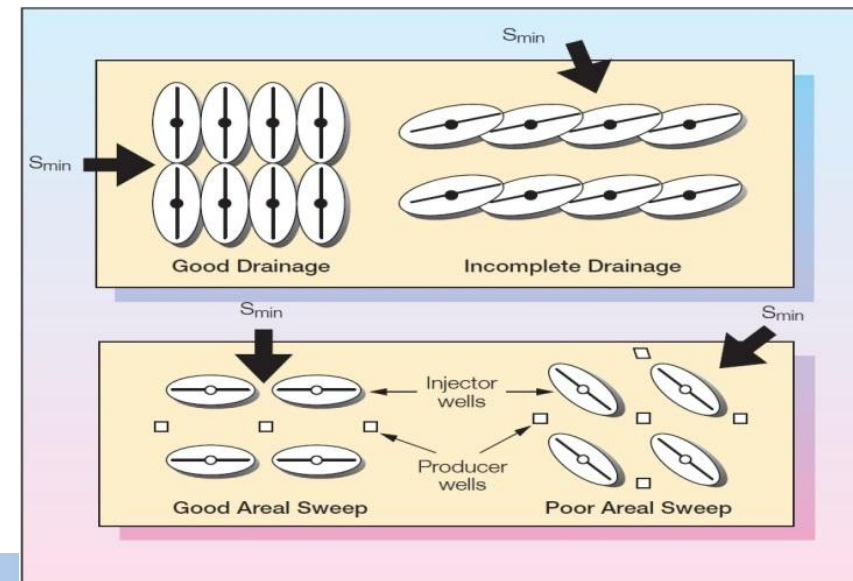


Знание направления и величины стресса помогает выполнить гидроразрыв, обеспечив развитие трещин в нужном направлении

Knowledge of stress direction and magnitude helps to make fractures go in the right direction while fracking

Понимание ориентации трещин является критичным для правильной проводки ствола скважины как для целей наилучшего дренажа, так и для целей эффективного заводнения

Understanding of natural fractures orientation is critical for choosing right well bore trajectory either for drainage or flooding



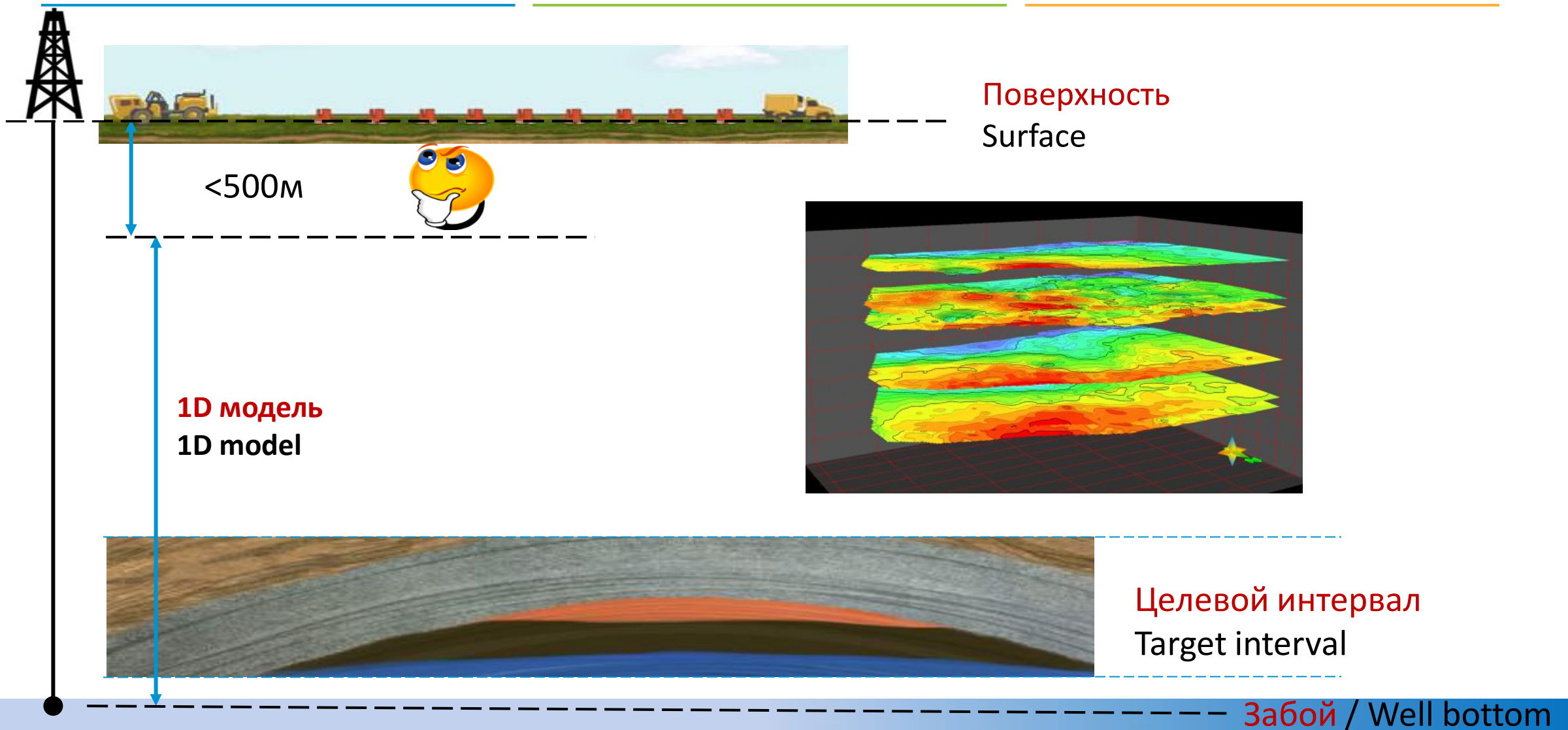
1D геомеханическая модель

1D geomechanical model

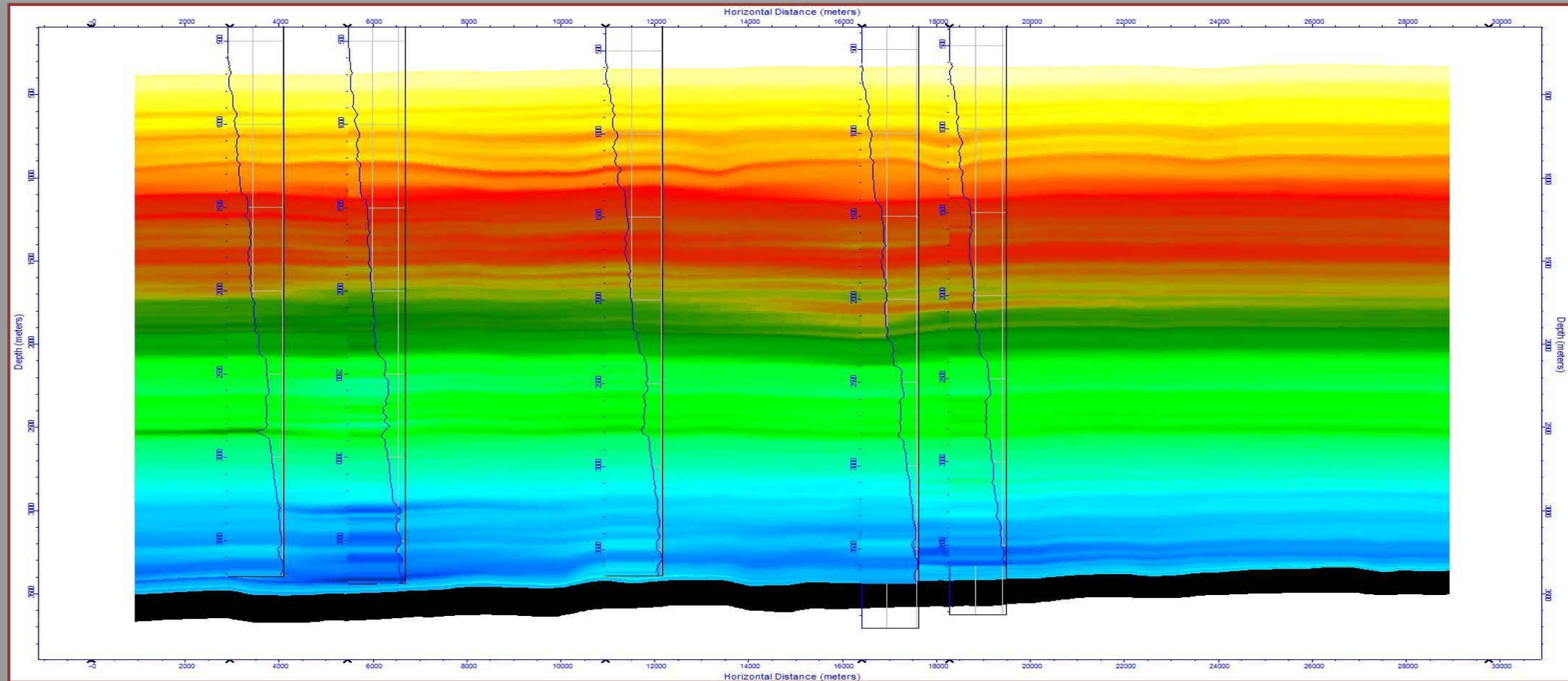
Петрофизическая интерпретация



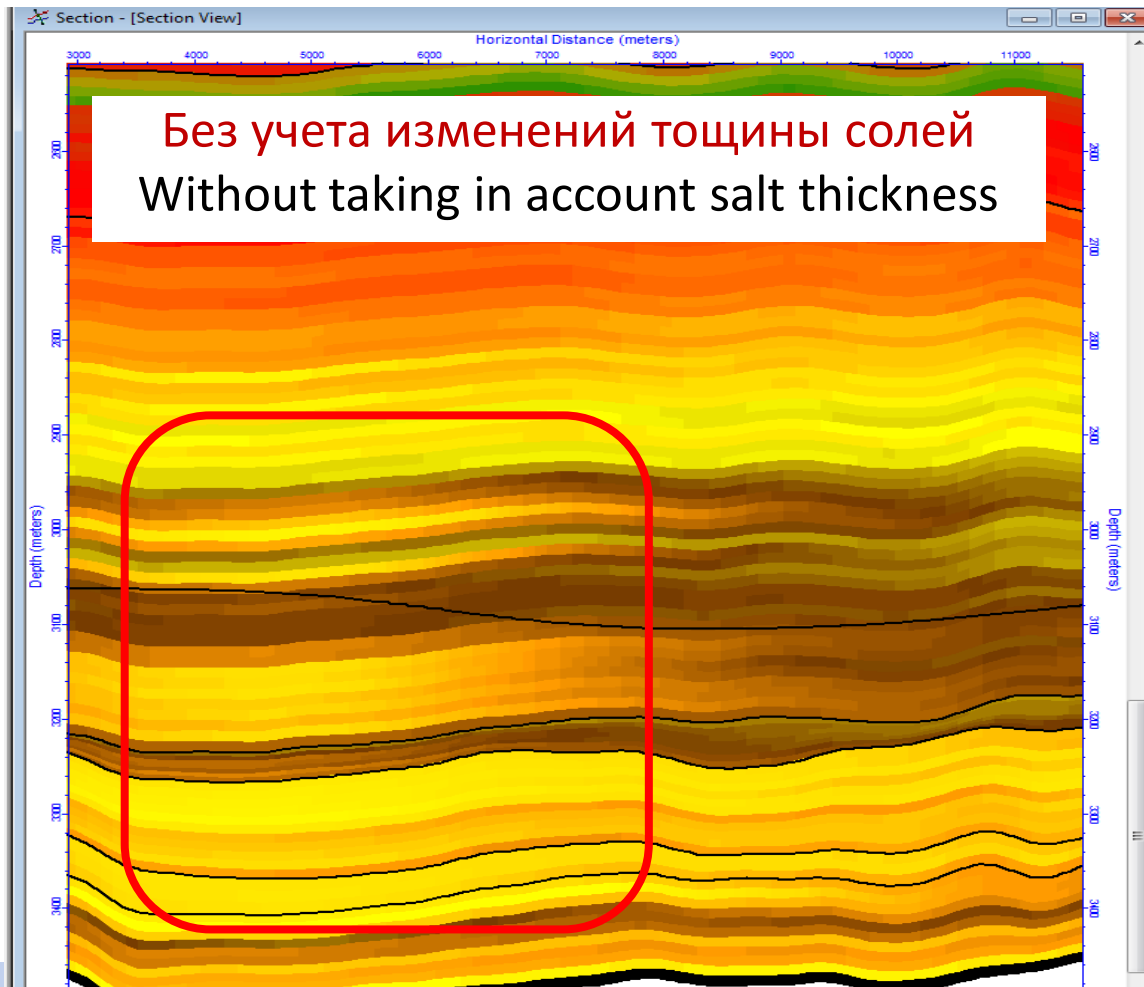
Интервал построения 1D геомеханической модели 1D geomechanical model interval



Напряжение на сдвиг / Shear stress

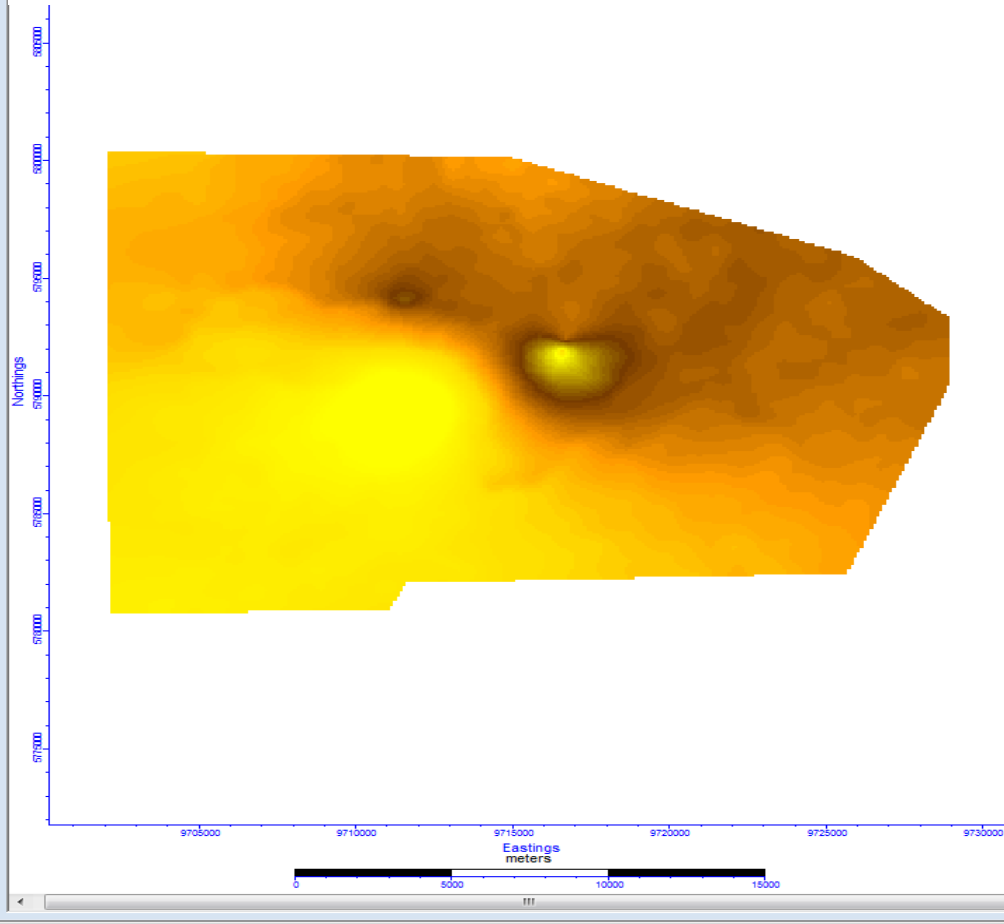


Напряжение на сдвиг / Shear stress

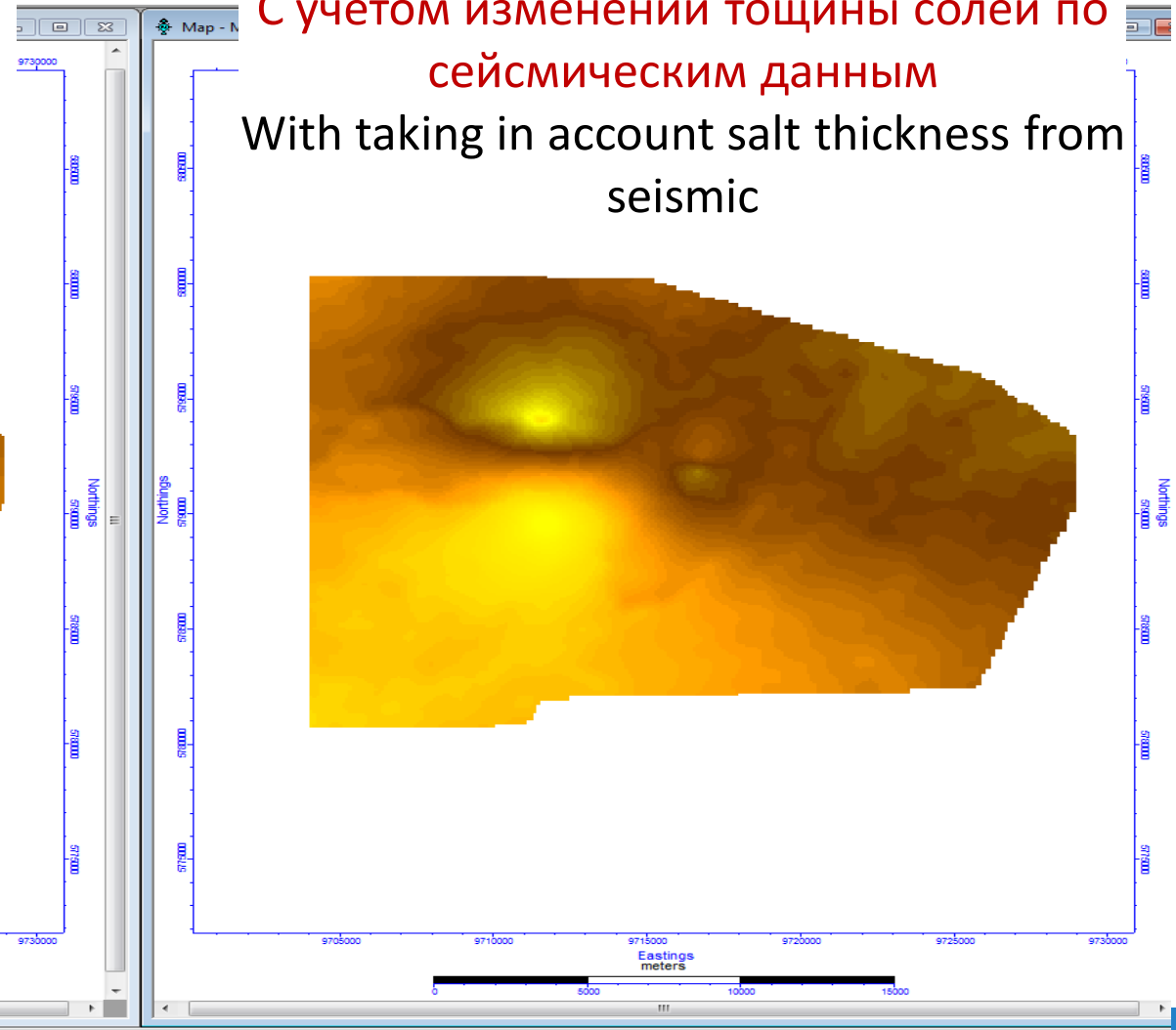


Напряжение на сдвиг / Shear stress

Без учета изменений толщины солей
Without taking in account salt thickness



С учетом изменений толщины солей по
сейсмическим данным
With taking in account salt thickness from
seismic



3D геомеханическая модель

3D geomechanical model

- **Модуль Юнга / Young modulus** E [ГПа] =
- **Статический модуль Юнга / Static Young modulus**

$$\frac{\rho V_S^2 (3V_P^2 - 4V_S^2)}{V_P^2 - V_S^2}$$

- **Коэффициент Пуассона / Poisson ratio**
- **Горное давление / Rock pressure** $P_v = \rho g H$
- **Поровое давление / Pore pressure** $P_p = \rho_{fl} g H$

$$\nu = \frac{V_P^2 - 2V_S^2}{2(V_P^2 - V_S^2)}$$

- **Коэффициент хрупкости / Brittleness**
$$\text{Britt} = (100 * (E_s - E_{smin}) / (E_{smax} - E_{smin}) + 100 * (\nu - \nu_{max}) / (\nu_{min} - \nu_{max})) / 2$$
- **Коэффициент прочности на сжатие / Compressive strength**
$$\text{USC} = ((7682 / (DT / 3.2808))^{1.82}) / 145$$

- **Минимальное горизонтальное напряжение / Minimum horizontal stress**

$$Sh = (Poi/(1-Poi))*(Pv - \alpha * Pp) + \alpha * Pp + TEC$$

TEC = тектонический фактор / tectonic factor,

α - коэффициент Био / Bio coefficient

- **Максимальное горизонтальное напряжение / Maximum horizontal stress**

$$SH_{max} = Sh + 0.2 * (Pv - Sh)$$

- **Среднее эффективное напряжение / Average effective stress**

$$P' = (Pv + 2 * Sh) / 3$$

- **Напряжение на сдвиг / Shear stress**

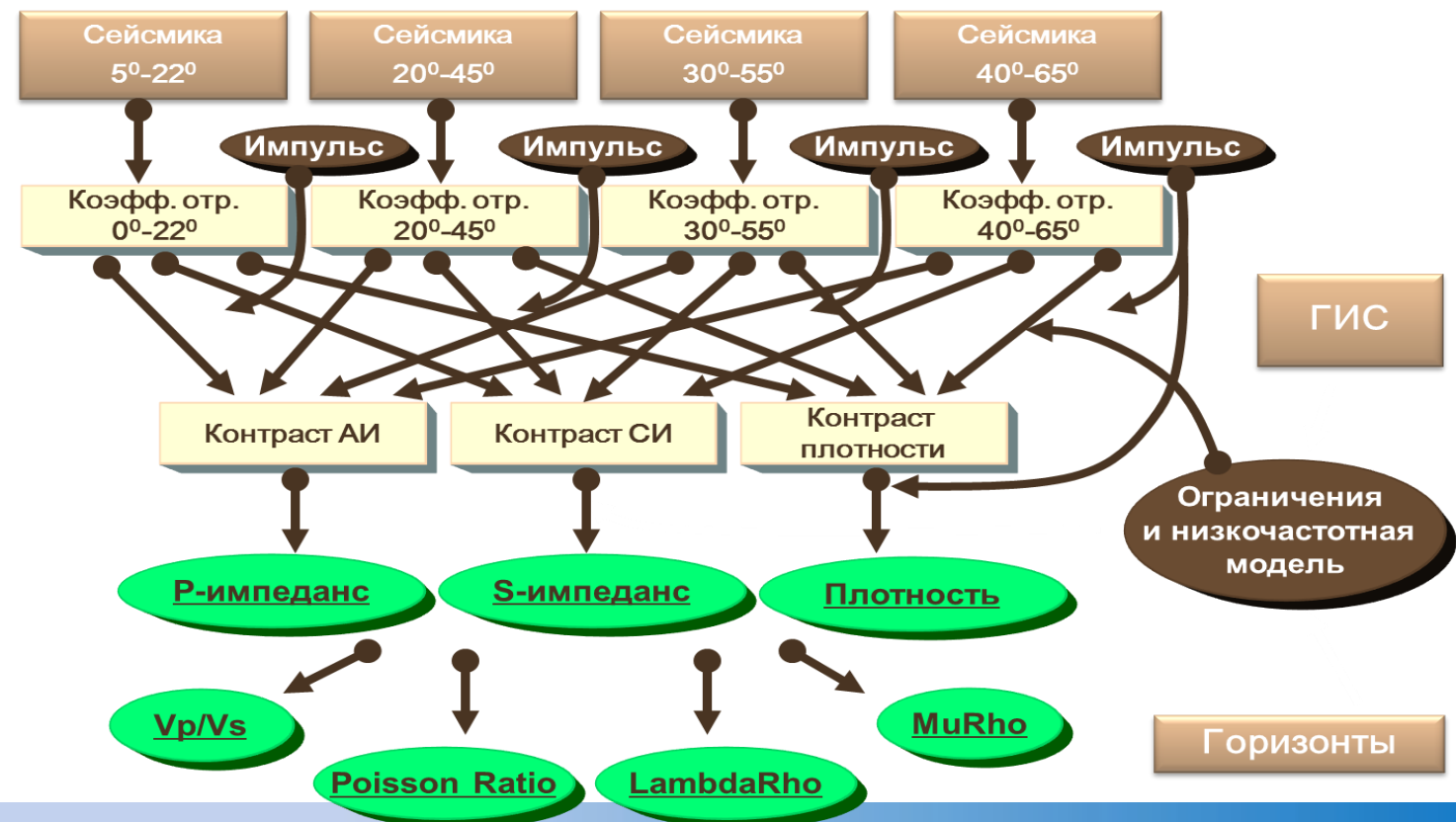
$$q = (Pv - 0.8 * Sh)$$

- **Давление гидроразрыва / Fracturing pressure**

В основе всех оценок /
All estimations are based
on:

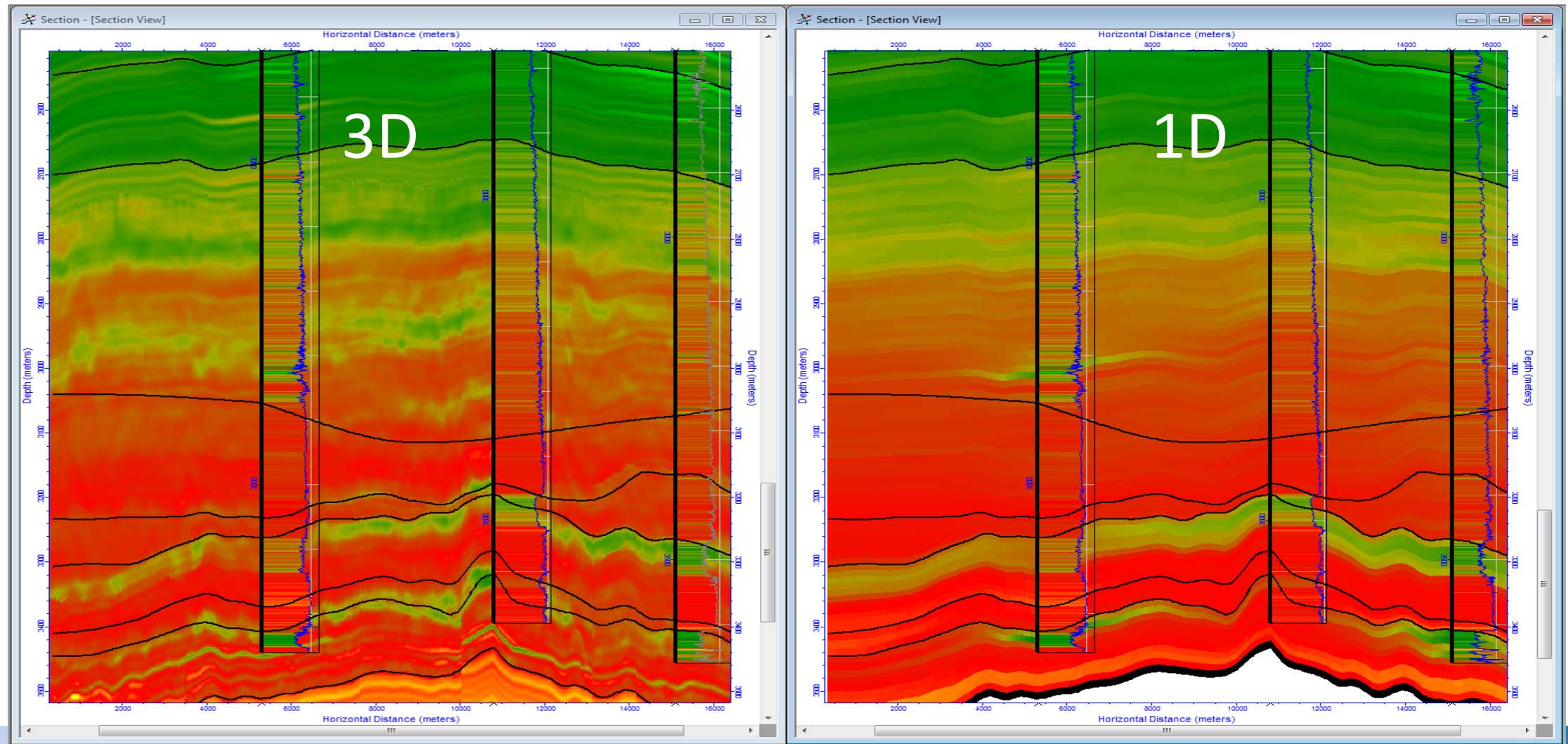
- V_p
- V_s
- **Плотность** / Density

Синхронная инверсия Simultaneous Inversion



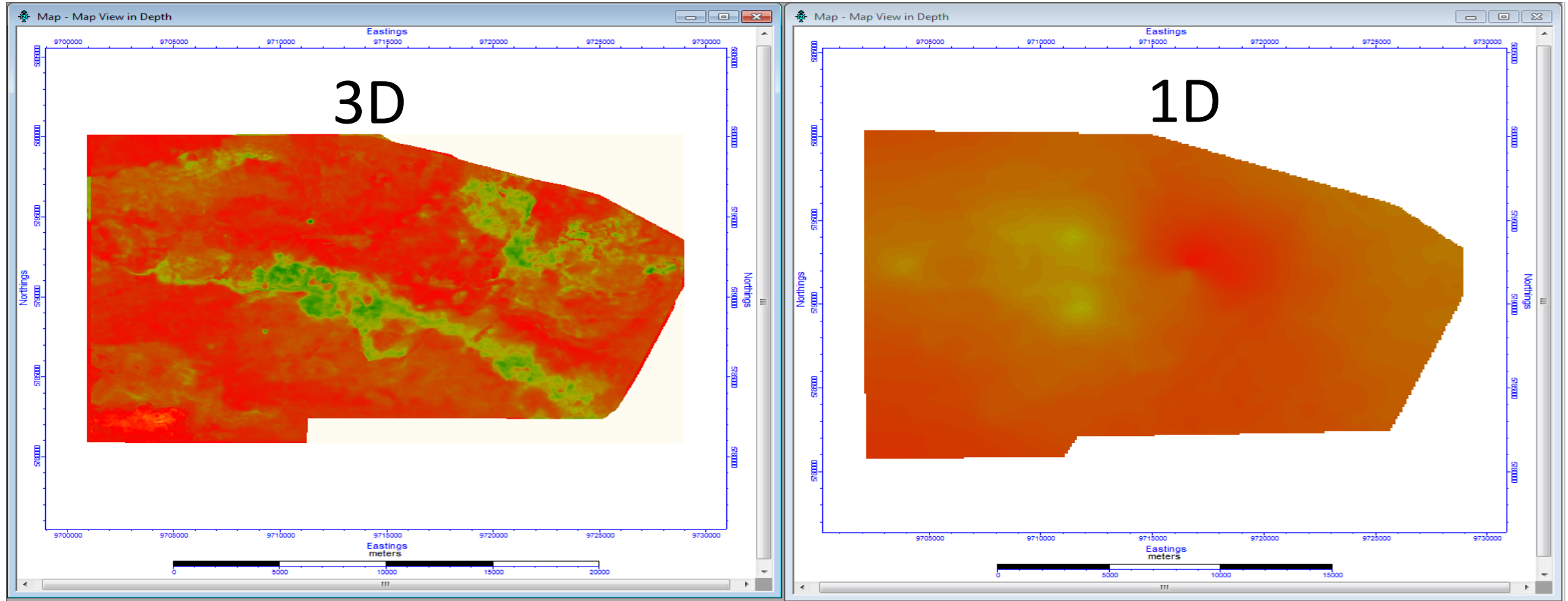
Сопоставление 1D и 3D моделей

3D to 1D model comparison



Сопоставление 1D и 3D моделей

3D to 1D model comparison



Интеграция всех данных об объекте

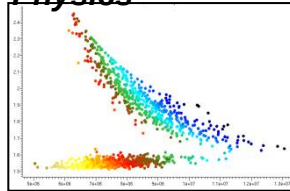
All data integration

Гипотезы/Hipotesis

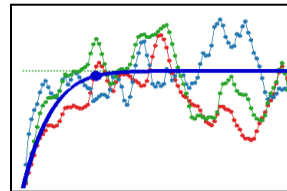
Геология/Geology



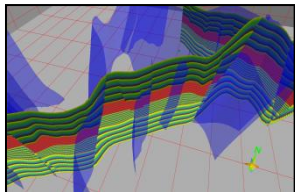
Рок-физика/Rock Physics



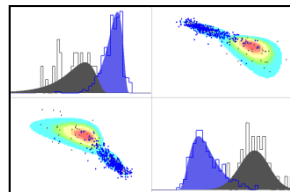
Геостатистика/Geostats



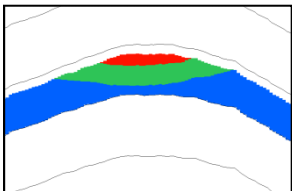
Страт. Сетка/Grids



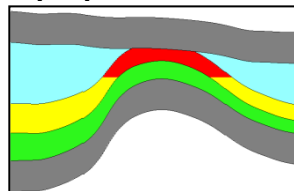
Многомерные PDF/Multidimensional PDF



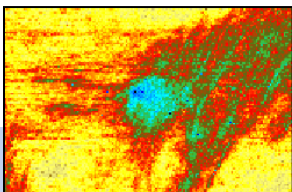
Данные о контактах флюидов/
Fluid contacts



Пропорции фаций/Facies proportions

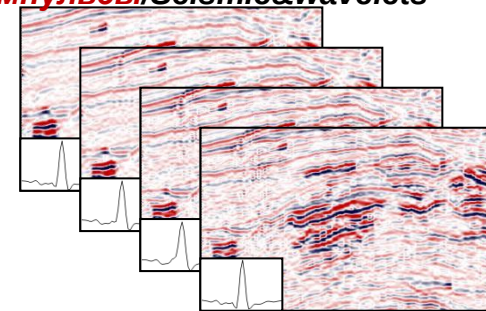


Соотношение сигнал/шум/Signal to noise ratio

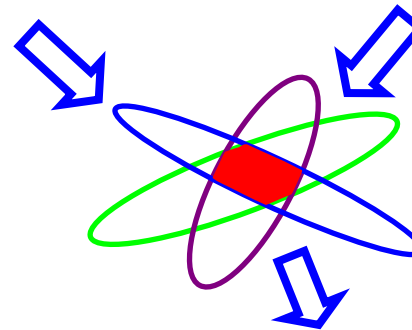
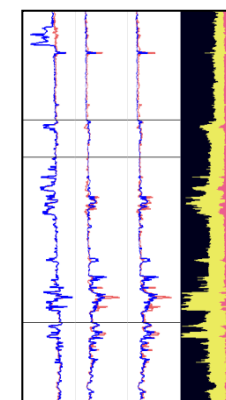


Наблюдения/Observations

Сейсмика и
импульсы/Seismic&wavelets

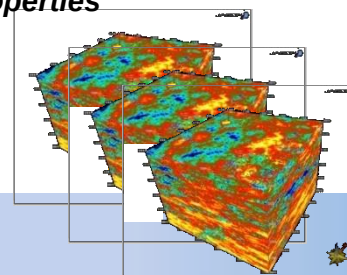


Скважины/Wells

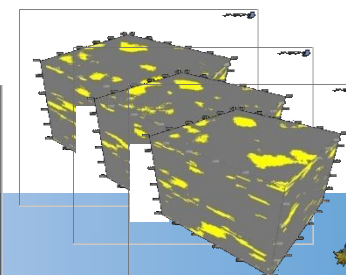


Модель резервуара/Reservoir model

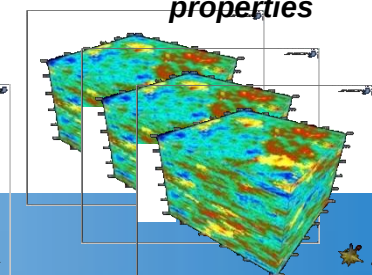
Упругие свойства/Elastic properties



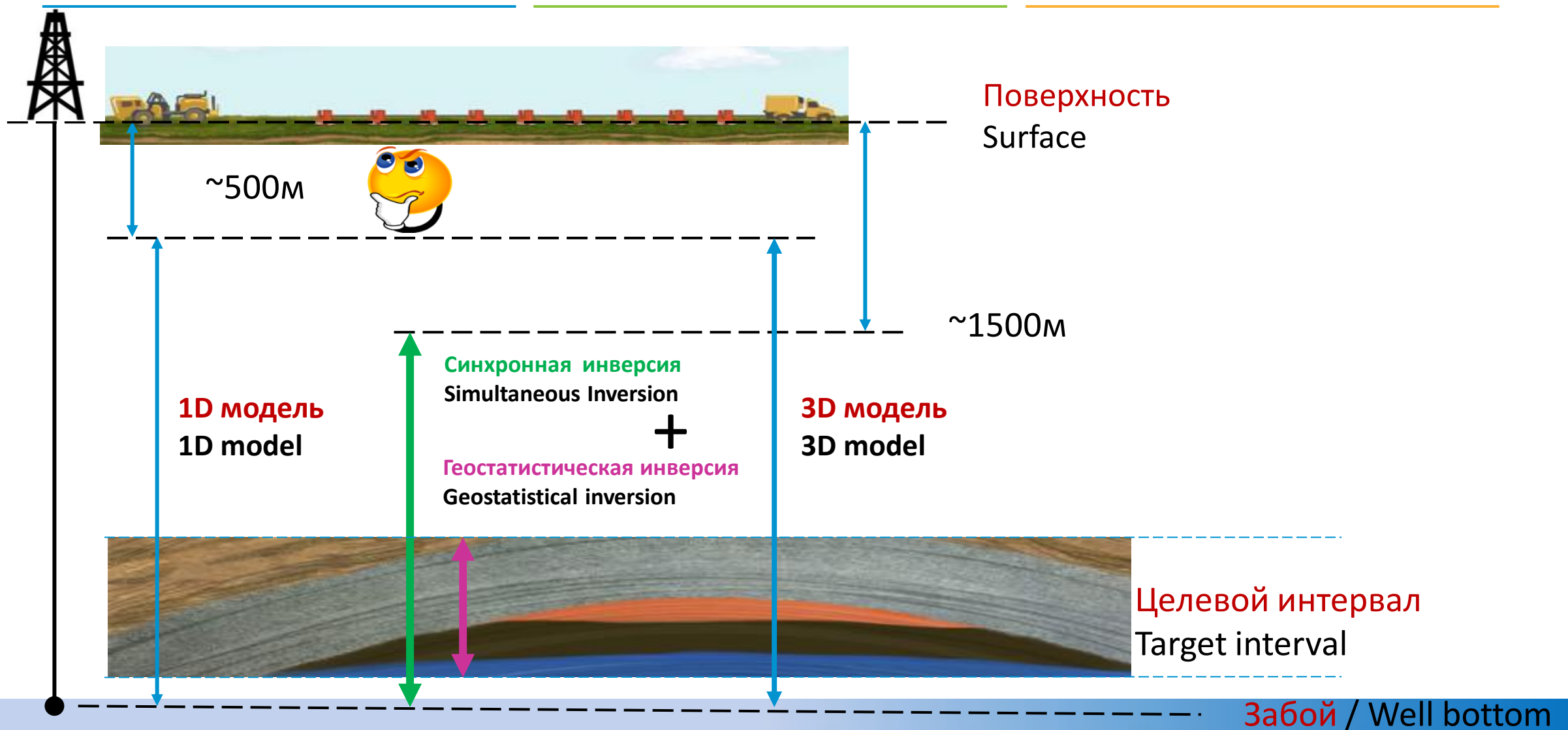
Фации/Facies



Инженерные свойства/Engineering properties

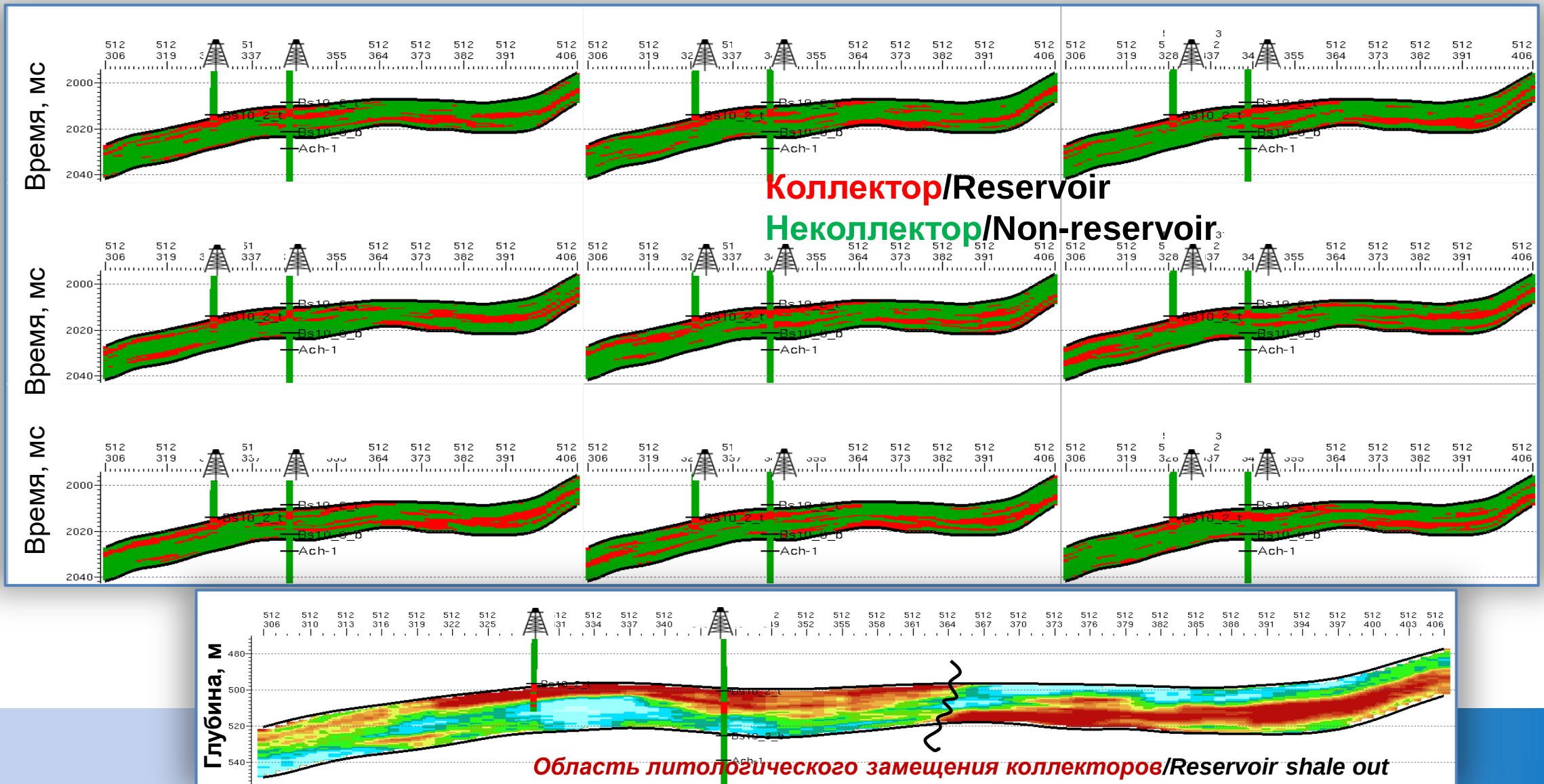


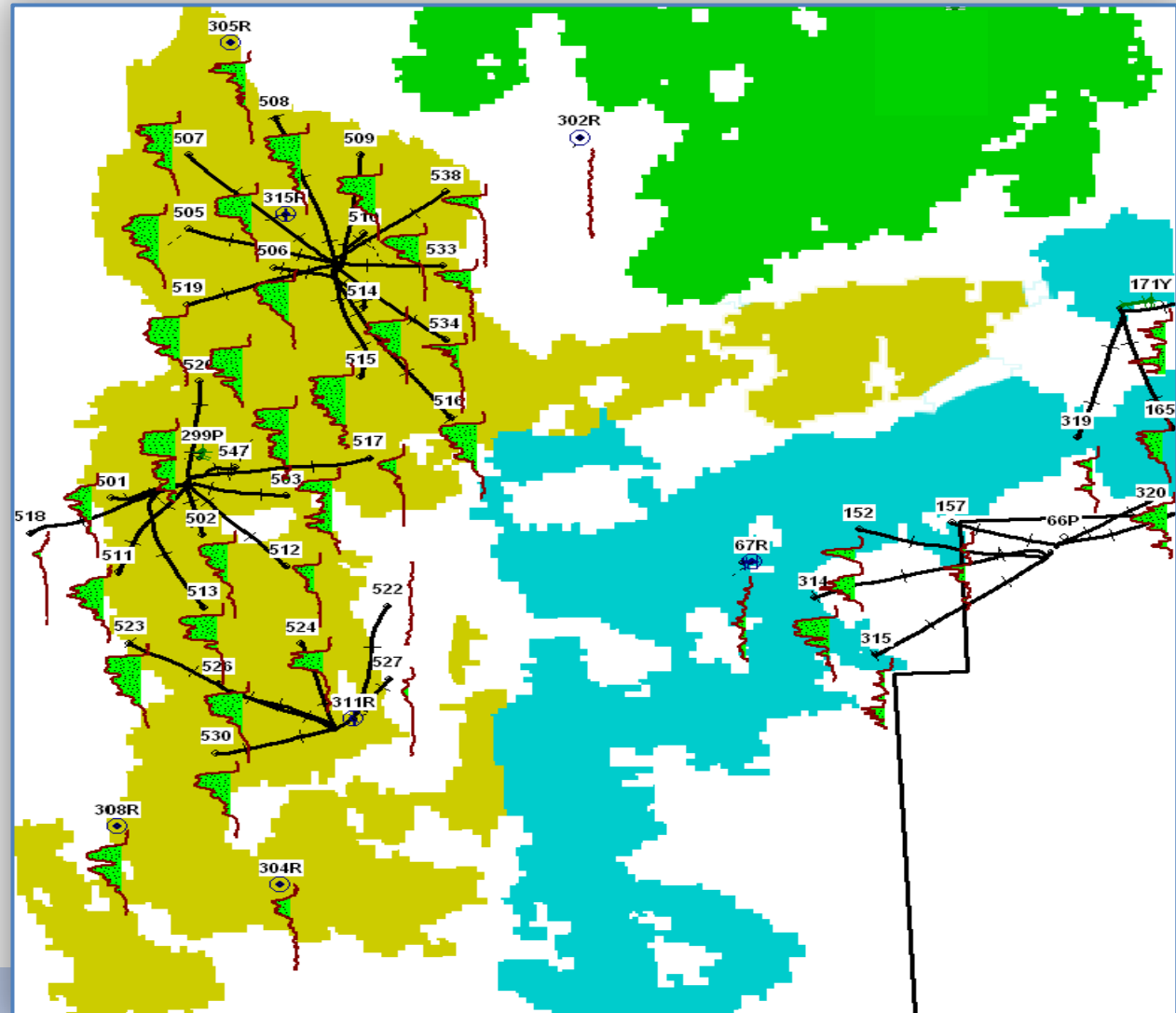
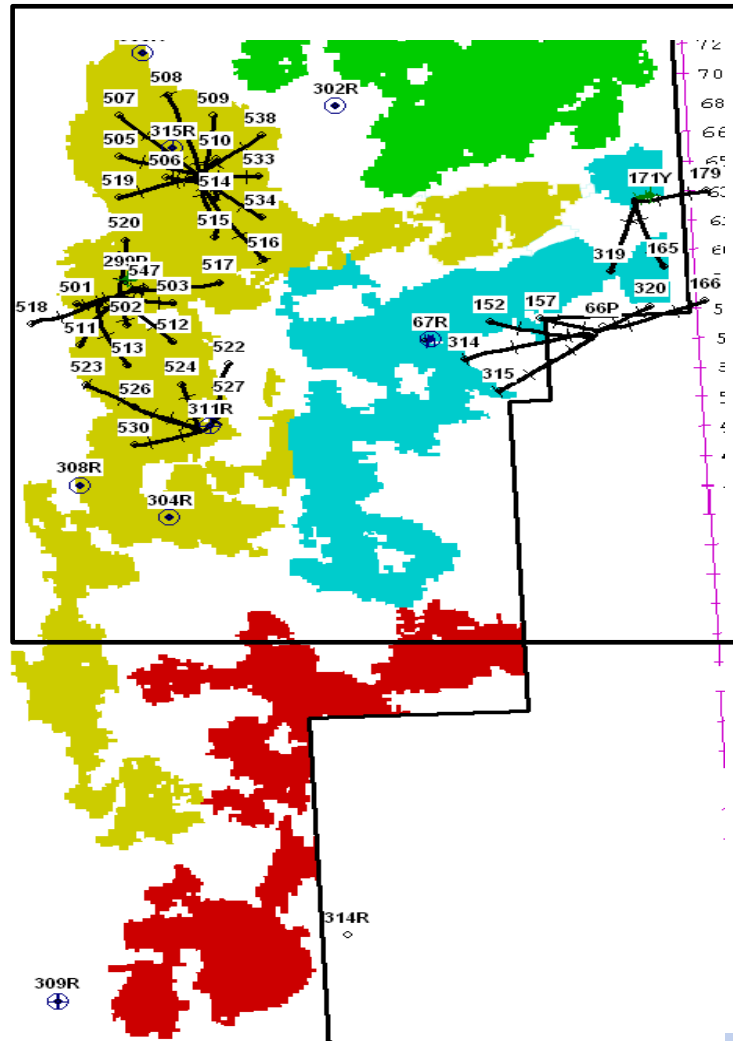
Интервал построения 3D геомеханической модели 3D geomechanical model interval



Геостатистика – для геомеханики

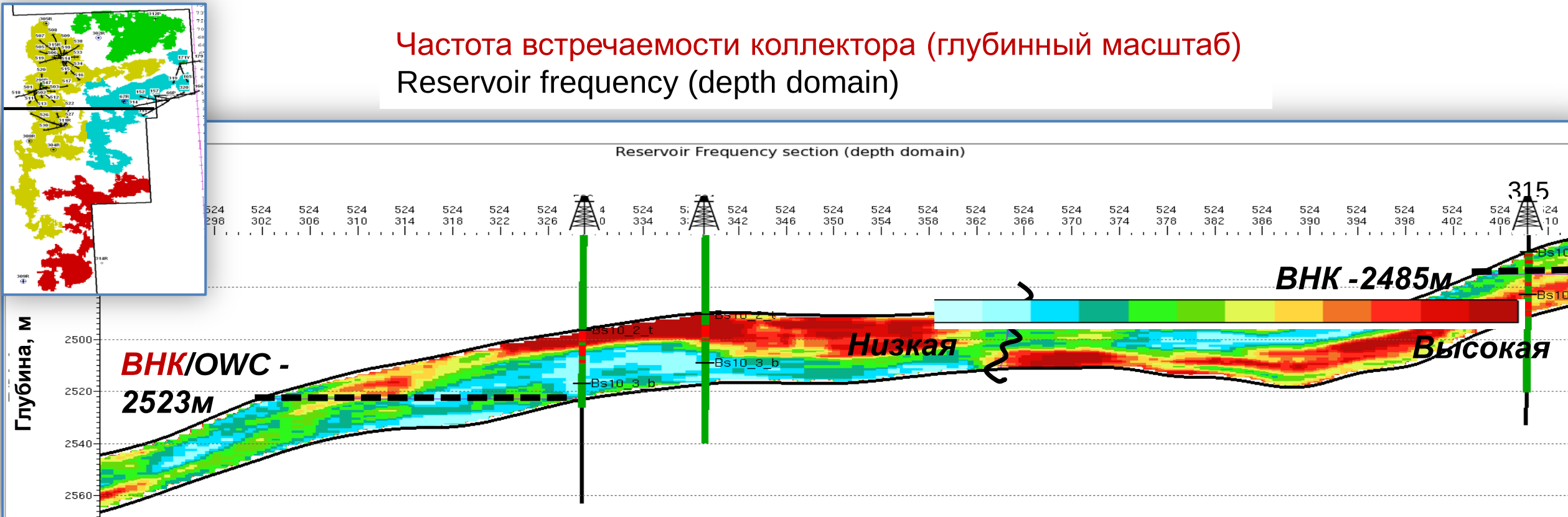
Традиционные результаты





Cross-section through the oil-bearing sand

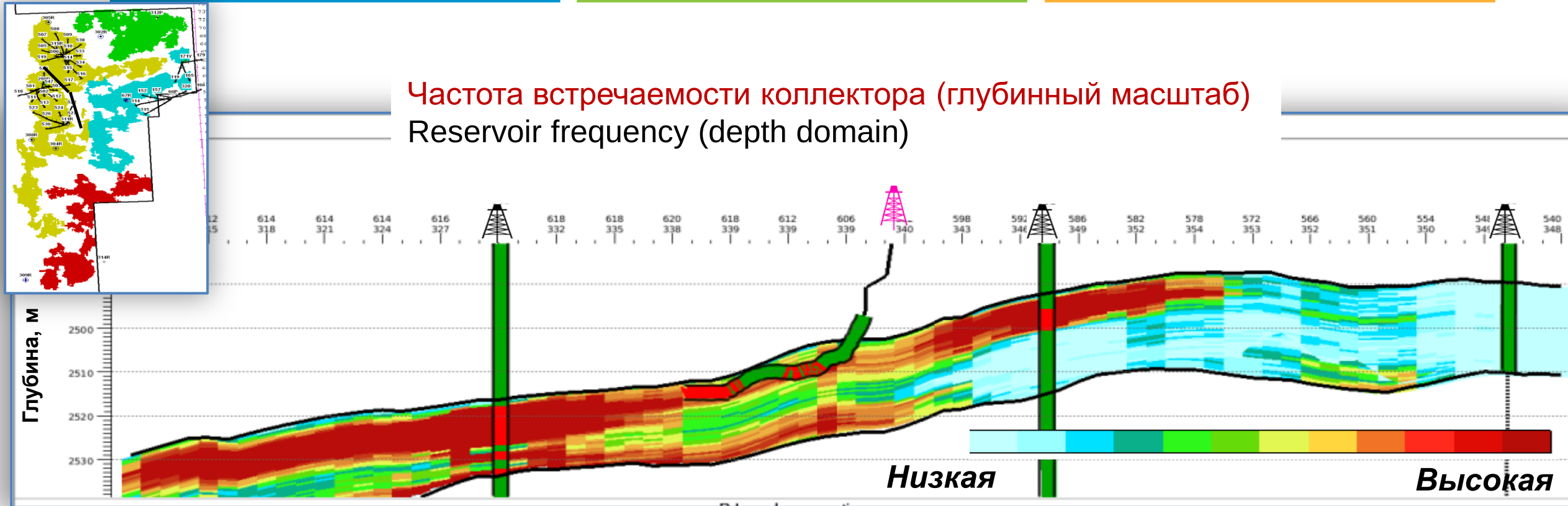
Частота встречаемости коллектора (глубинный масштаб)
Reservoir frequency (depth domain)



Подтверждаемость горизонтальной скважиной

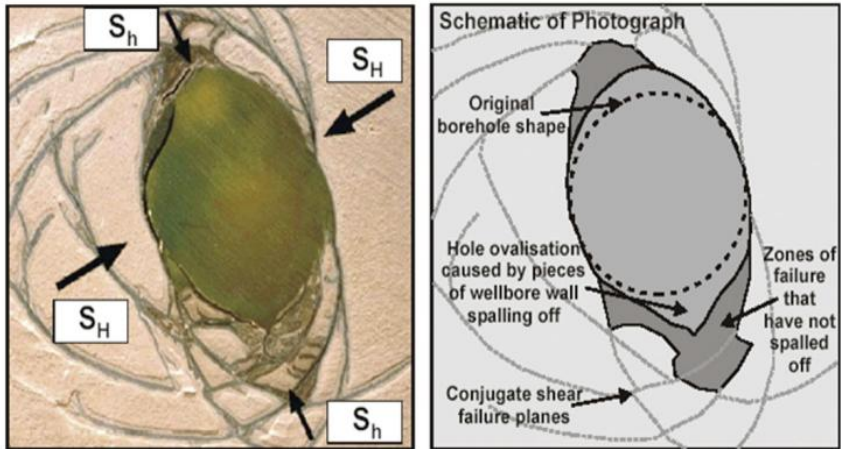
Proof by horizontal well

Частота встречаемости коллектора (глубинный масштаб)
Reservoir frequency (depth domain)

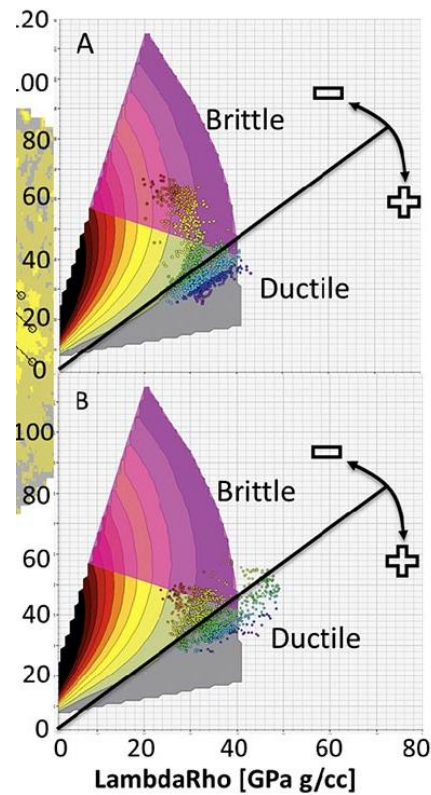


А что же для геомеханики?

And what for geomechanics?

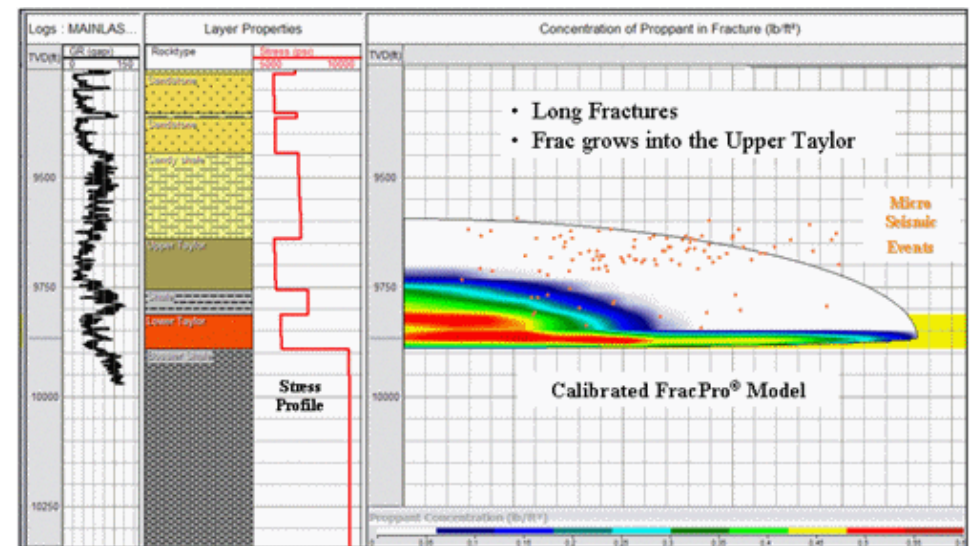


Прочностные характеристики пород
Rock strength parameters



Хрупкость/Brittleness

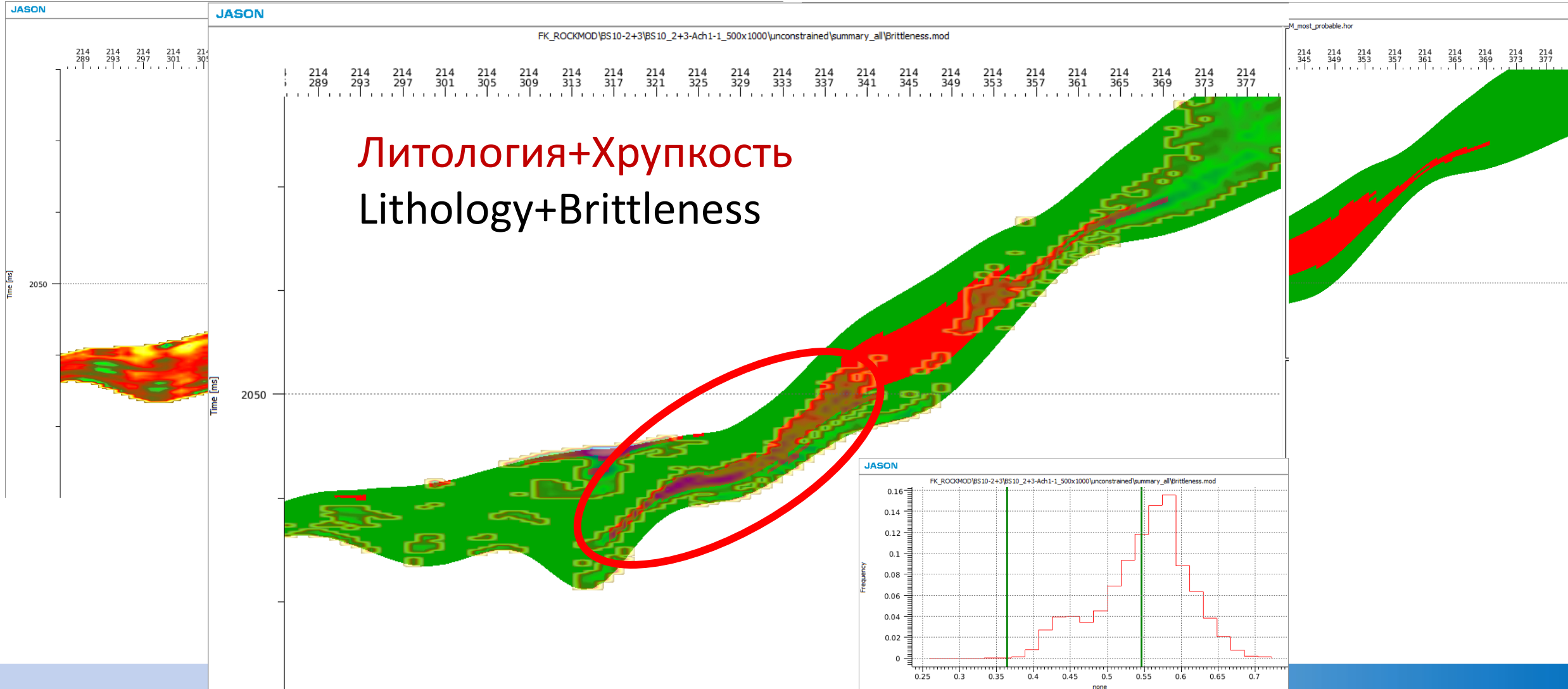
Моделирование ГРП
Fracking modeling



Выделение зон, перспективных для ГРП Zones good for fracking

Хрупкость/Brittleness

Литология/Lithology



Полная 3D геомеханическая модель

Full 3D geomechanical model

- **Напряженное состояние среды вызывает анизотропию упругих характеристик среды**/Stress is causing anisotropy of *elastic* rock properties
- **Чем больше плотность трещин, тем сильнее анизотропия**/The more fracture density the more anisotropy.

Анизотропная инверсия:

Теоретические основы метода

Уравнение Рюгера/Ruger equation

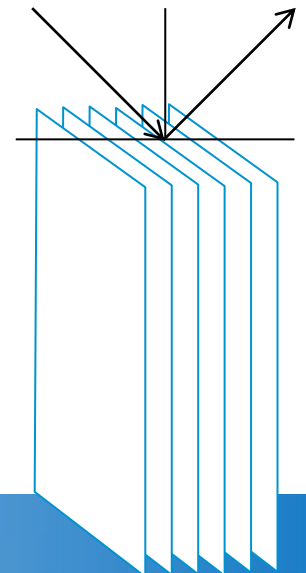
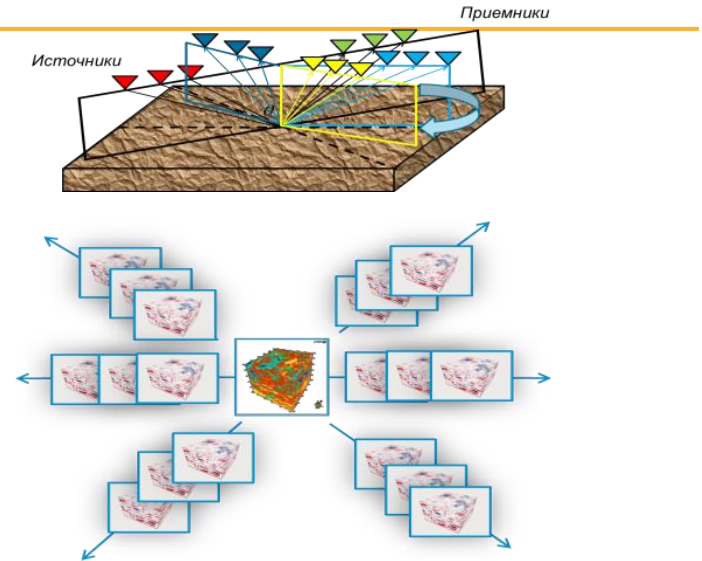
$$R_p(\theta) = R_0 + R_2 \sin^2 \theta + R_4 \sin^2 \theta \tan^2 \theta$$

Коэффициенты уравнения Рюгера/Ruger equation coefficients

$$R_0 = \frac{1}{2} \frac{\Delta Z_p}{\bar{Z}_p}$$

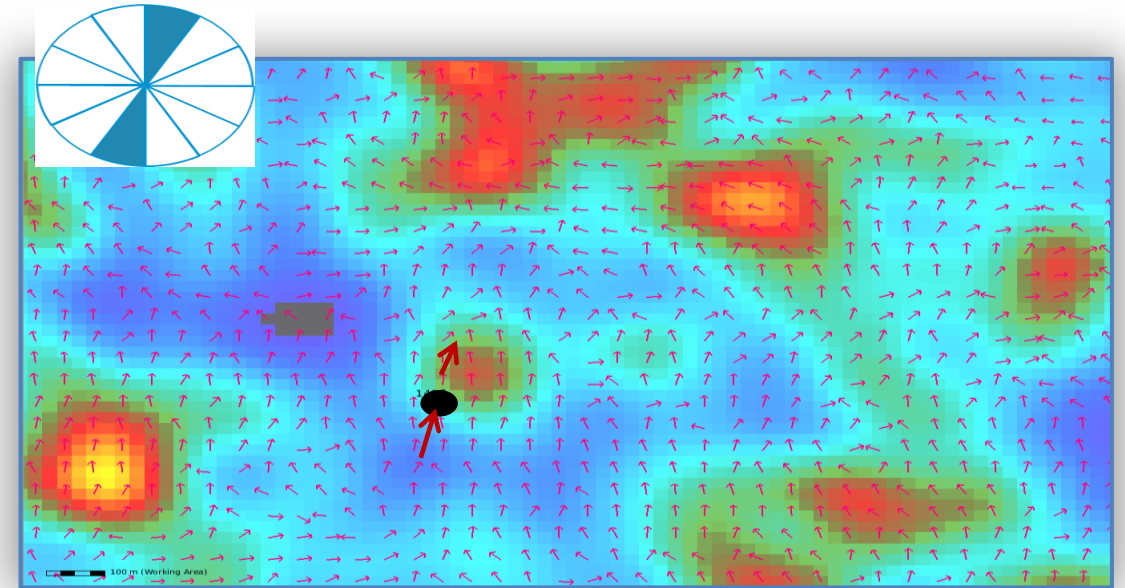
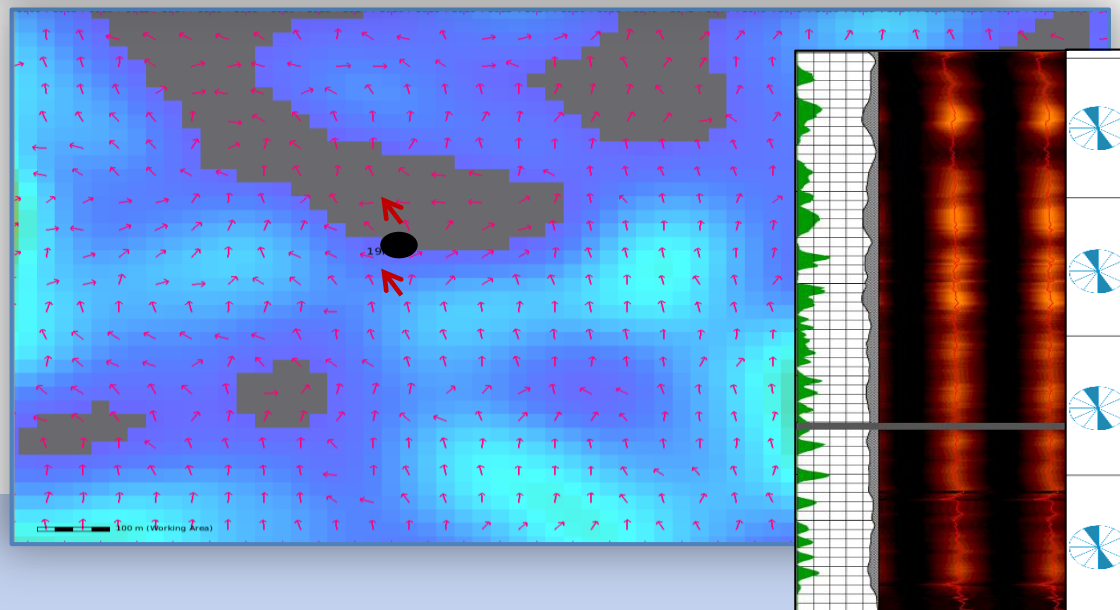
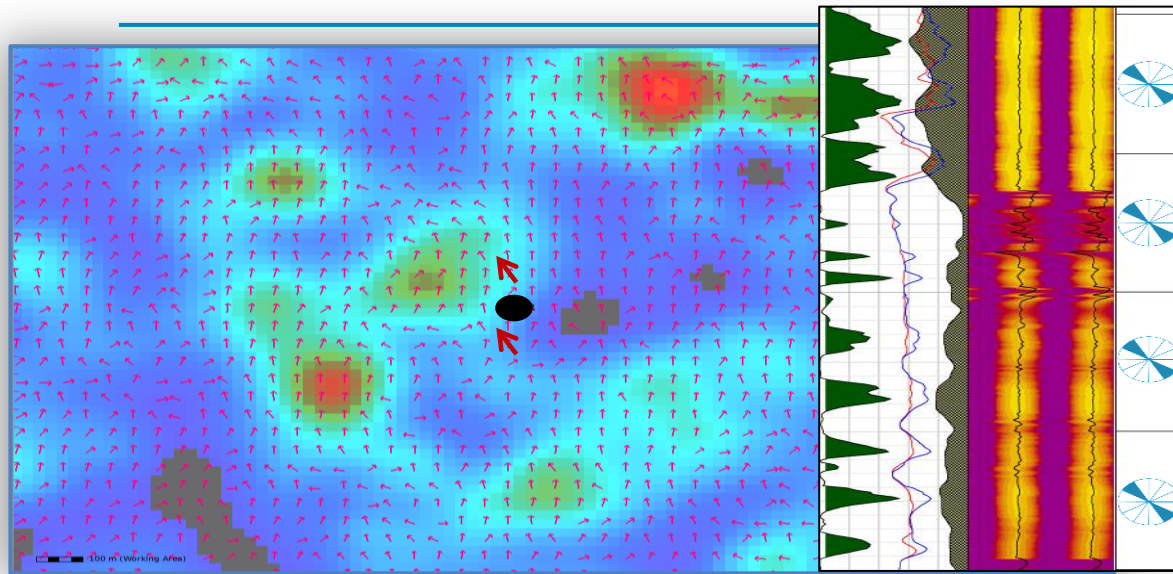
$$R_2 = \frac{1}{2} \left[\frac{\Delta V_p}{\bar{V}_p} - \left(\frac{2\bar{V}_s}{\bar{V}_p} \right)^2 \frac{\Delta G}{\bar{G}} + \left\{ \Delta\delta + 8 \left(\frac{\bar{V}_s}{\bar{V}_p} \right)^2 \Delta\gamma \right\} \cos^2(\omega - \phi) \right]$$

$$R_4 = \frac{1}{2} \left[\frac{\Delta V_p}{\bar{V}_p} + \Delta\epsilon \cos^4(\omega - \phi) + \Delta\delta \sin^2(\omega - \phi) \cos^2(\omega - \phi) \right]$$

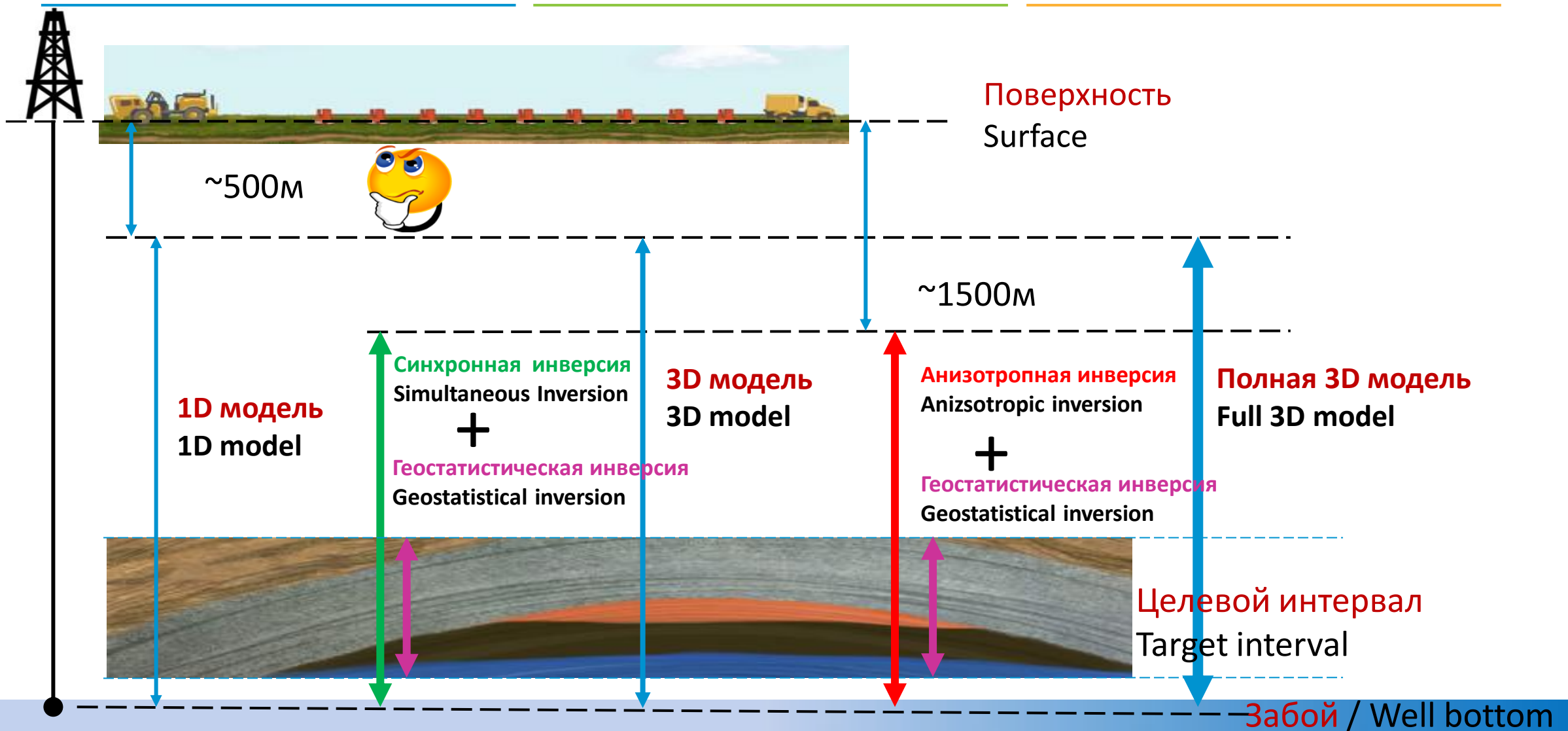


Результаты азимутальной синхронной инверсии

Anisotropic simultaneous inversion results



Интервал построения геомеханической модели



- Геостатистическое моделирование, контролируемое сейсмическими данными, является уникальным инструментом построения детальной модели резервуара/Seismic driven geostatistical modeling is the unique tool for building detailed reservoir models.
- Результаты геостатистического моделирования являются источником ценной информации для проектирования ГРП/Results of the geostatistical modeling are the source of valuable information for fracking planing.