



# Моделирование спектра VHE мюонов на больших глубинах

С.С. Хохлов, А.Г. Богданов, Р.П. Кокоулин, С.В. Мальцева,  
А.А. Петрухин, Е.А. Юрина

<sup>1</sup>Национальный исследовательский ядерный университет «МИФИ», НОЦ НЕВОД

# Very high energy (VHE) мюоны

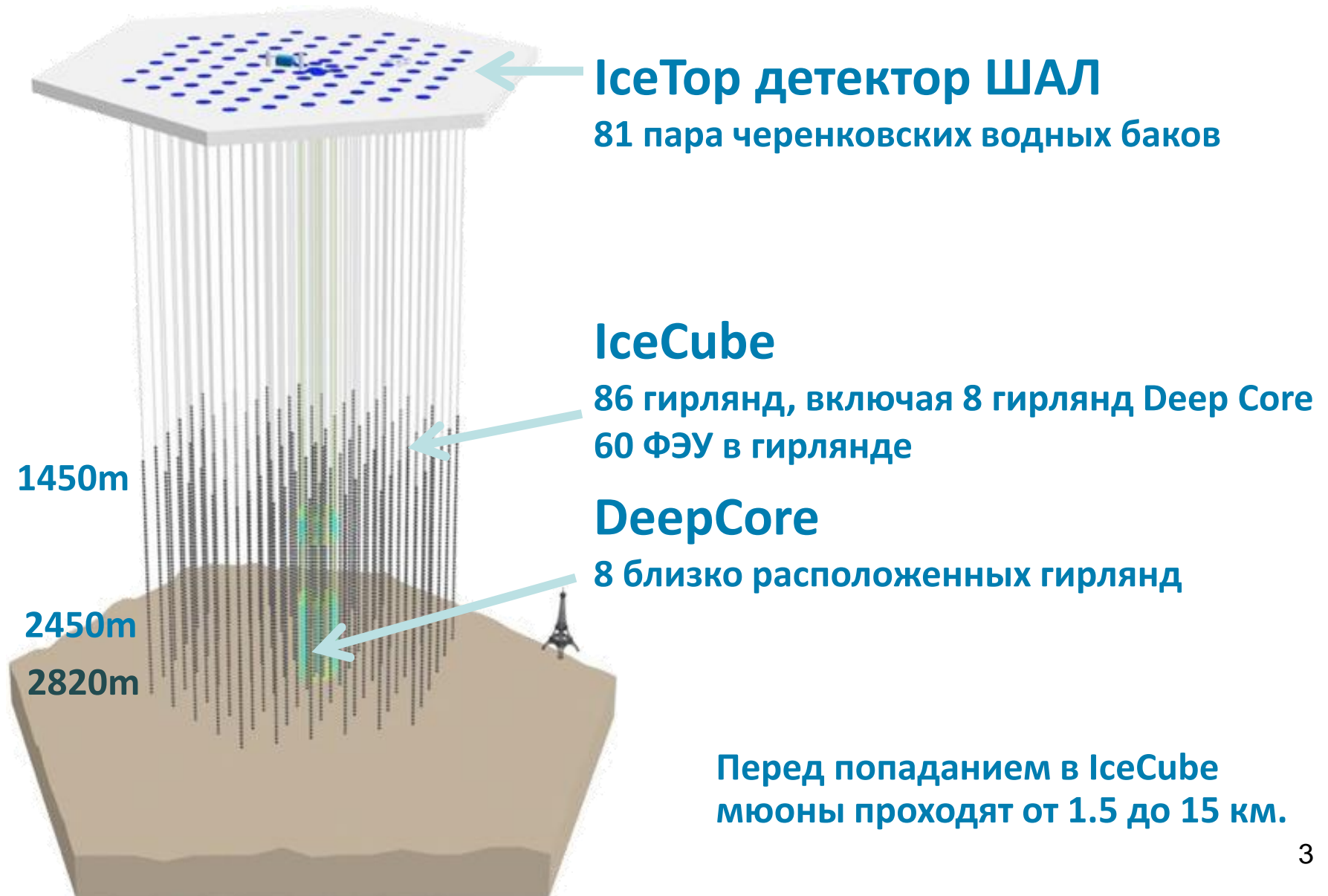
Измеренный спектр VHE мюонов позволит дать ответы на многие важные вопросы физики космических лучей и астрофизики (природа излома, происхождение нейтрино высоких энергий, рождение мюонов в «быстрых» процессах и др.).

С появлением нейтринных телескопов очень больших объемов (VLVnT) появилась принципиальная возможность измерения спектра мюонов с энергиями более 100 ТэВ.

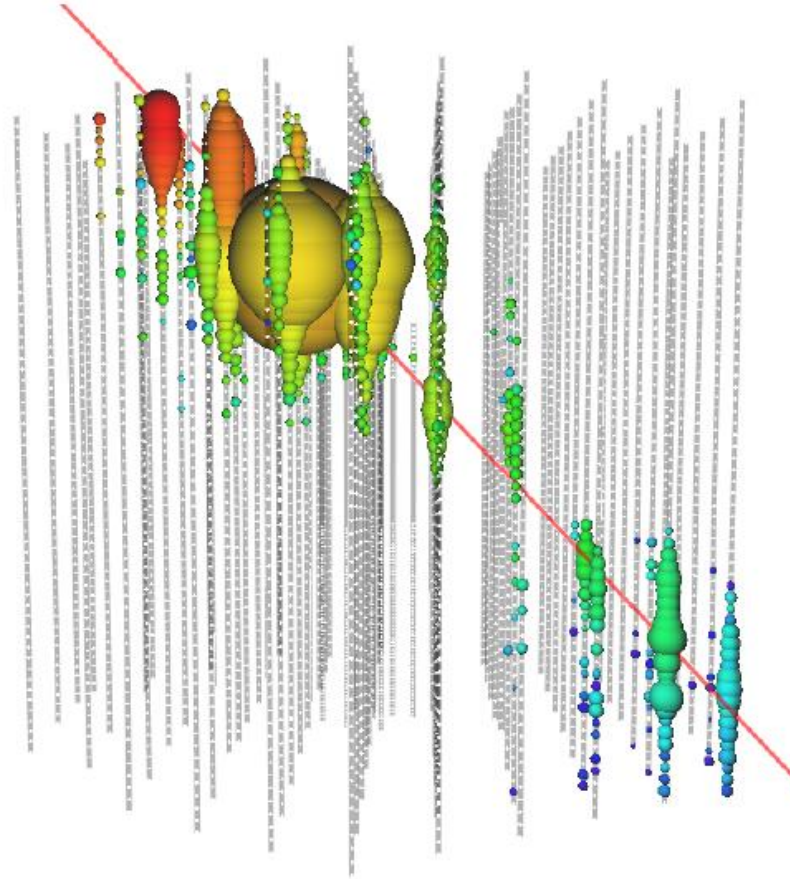
Специфика нейтринных телескопов (большие расстояния между ОМ, проблемы разделения VHE-мюонов и групп мюонов) требует разработки специальных методов для измерения спектров VHE-мюонов.

Для отладки этих методов и проведения разнообразных расчетов необходима быстрая программа для моделирования потерь энергии мюонов.

# Нейтринная обсерватория IceCube



# VHE мюоны в IceCube



Детектор IceCube и другие детекторы позволяют восстановить энергетический спектр VHE мюонов по измеренному спектру каскадных ливней.

G. Aartsen et al. "Characterization of the Atmospheric Muon Flux in IceCube",  
Astropart.Phys. 78, 1 (2016).

# Общая идеология программы моделирования

Виды потерь:

1. Ионизационные потери;
2. Рождение  $e^+e^-$ -пар;
3. Тормозные потери;
4. Неупругое взаимодействие мюонов с ядрами.

Средние потери энергий мюонов можно оценить с помощью формулы:

$$-\frac{dE}{dx} = a + bE$$

Все процессы потери энергии разделены на непрерывные с малой передачей энергии ( $V < 0.001$ ) и дискретные с большой долей передачи энергии ( $V > 0.001$ )

# Схема моделирования

$$\Sigma = \int_{V_{min}}^{V_{max}} \frac{d\sigma}{dV} dV$$

1. Разыгрывание длины свободного пробега для случайных процессов:

$$x = -\frac{\ln \gamma}{\Sigma},$$

2. Расчет непрерывных потерь:

$$-\frac{dE}{dx} = a + b_{\text{непр}}E,$$

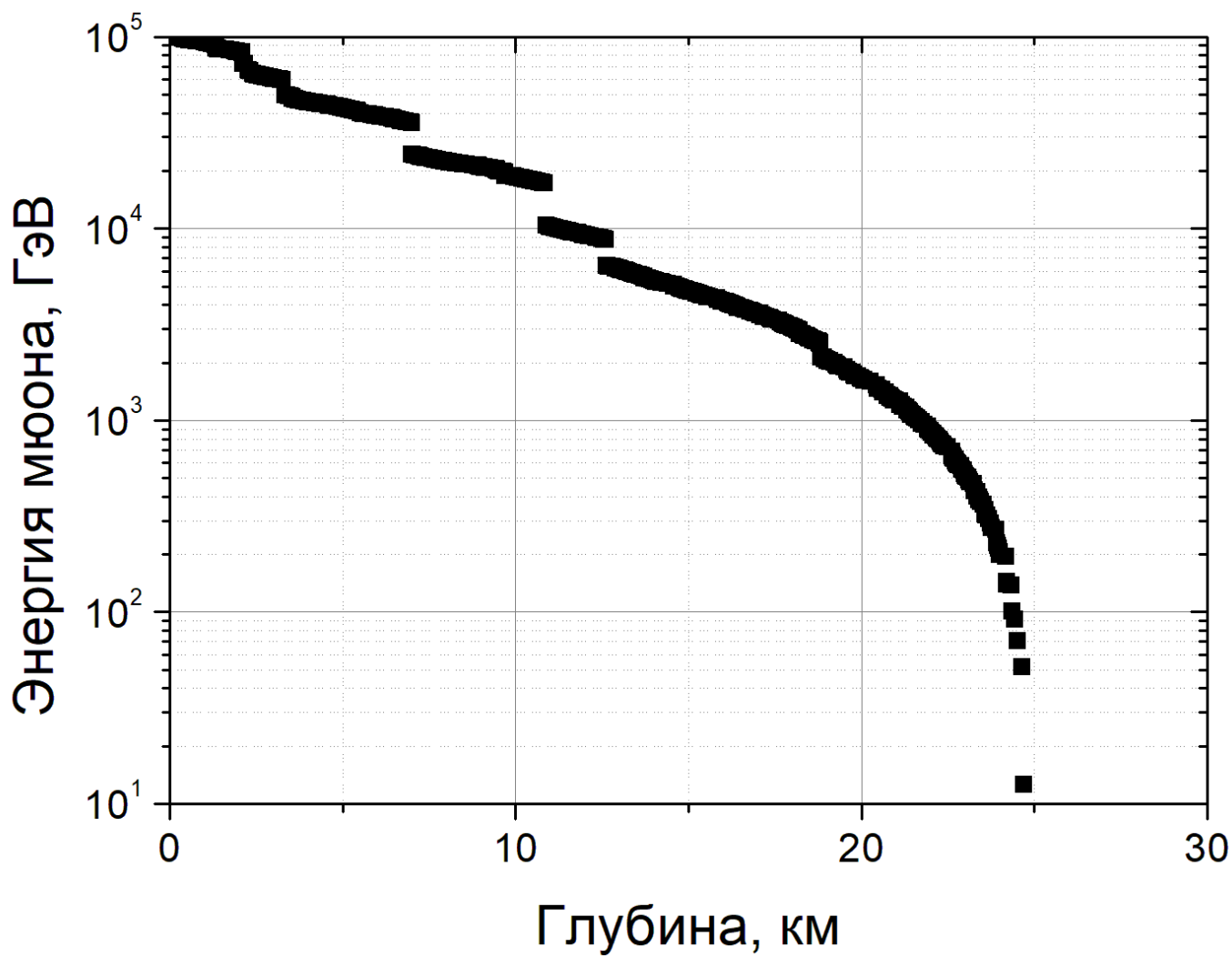
3. Выбор процесса дискретной потери энергии.

4. Разыгрывание каскада и расчет оставшейся энергии мюона:

$$\gamma \Sigma = \int_{V_{min}}^V \frac{d\sigma}{dV} dV$$

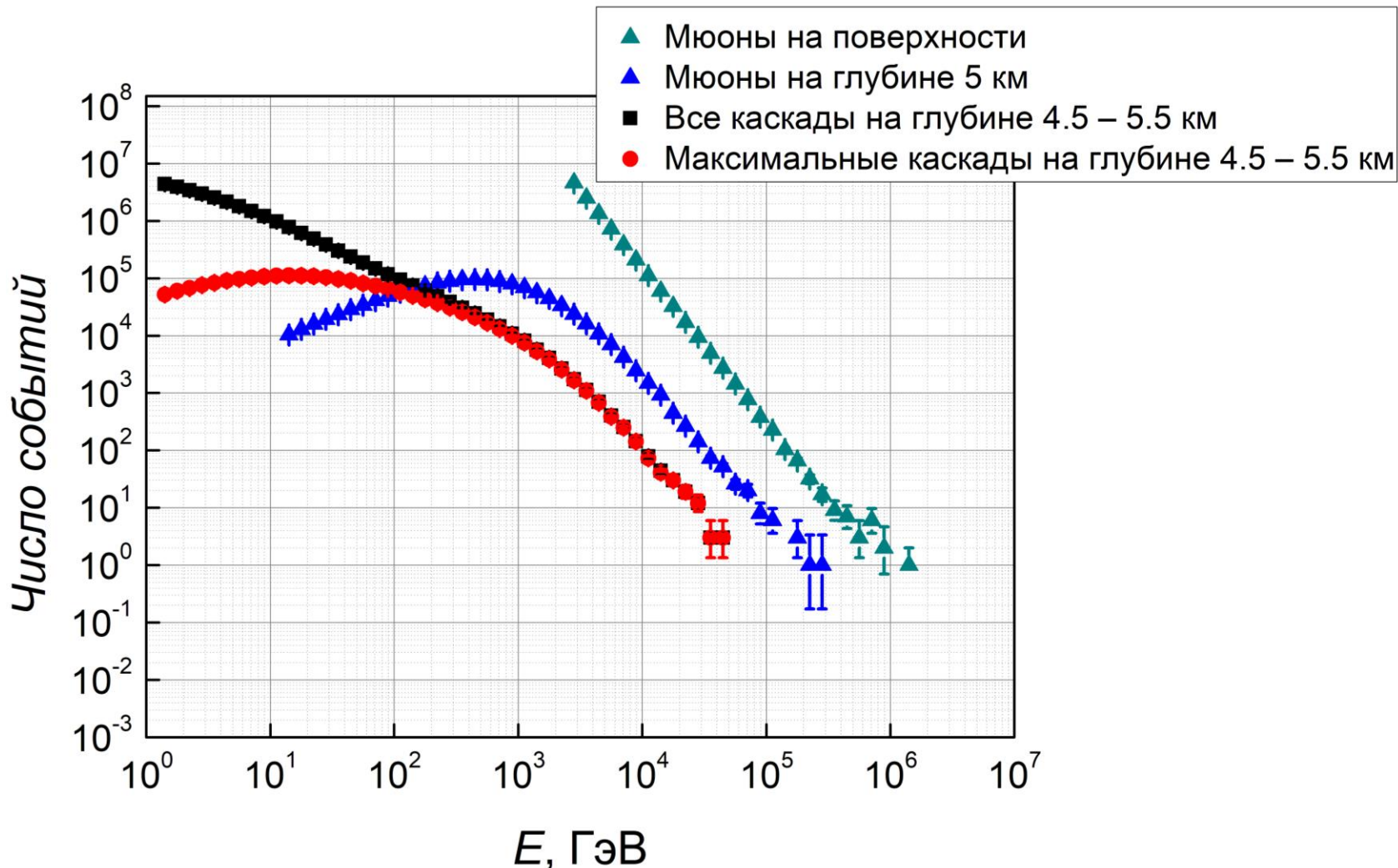
5. Возврат к началу цикла с меньшей энергией мюона.

# Пример моделированного события с энергией мюона $E = 100$ ТэВ



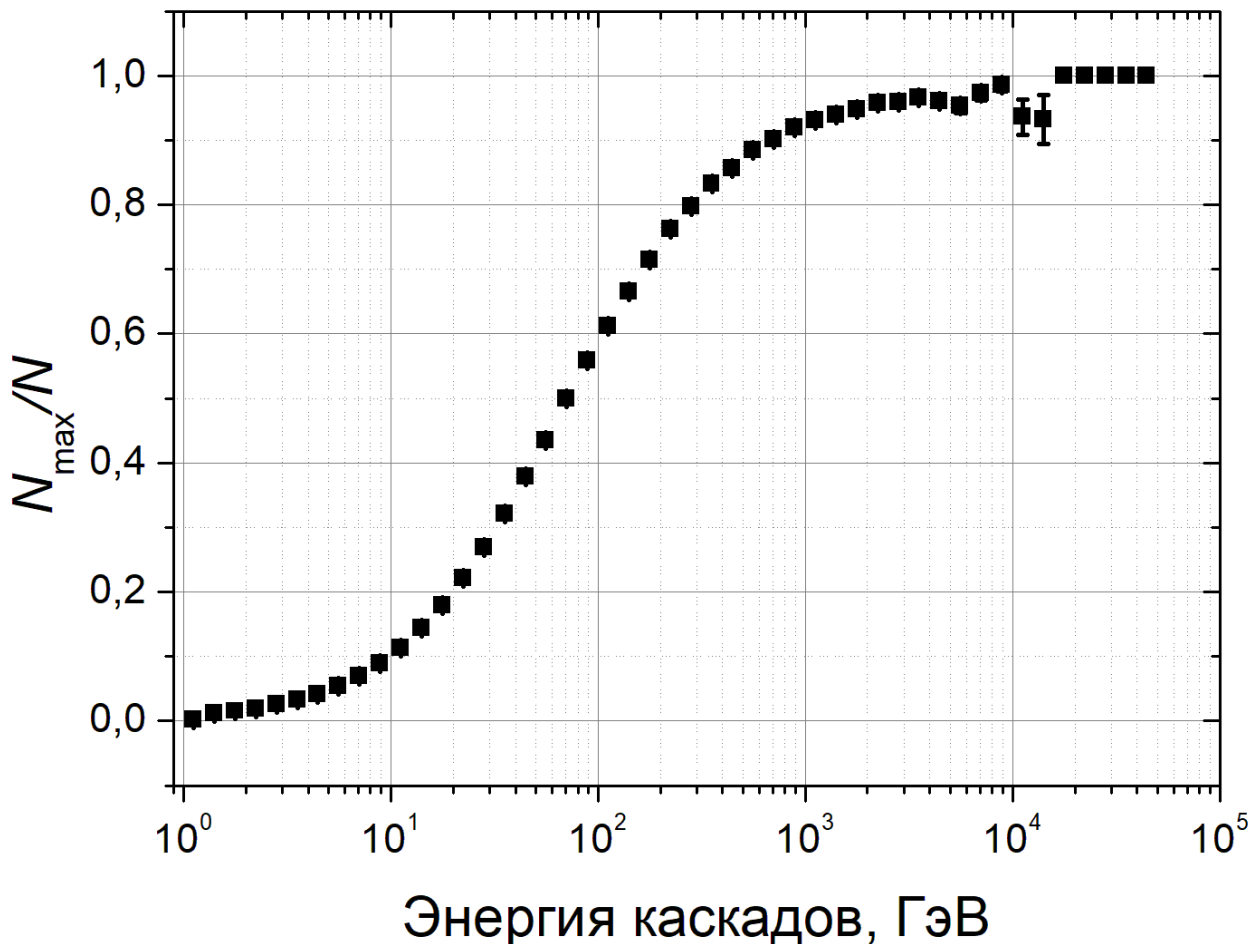
Скорость моделирования событий составляет  $25 - 50 \text{ с}^{-1}$ . 7

# Спектр мюонов на поверхности ( $\gamma = 3.7$ ) и спектры мюонов и каскадов на глубине 4.5 – 5.5 км



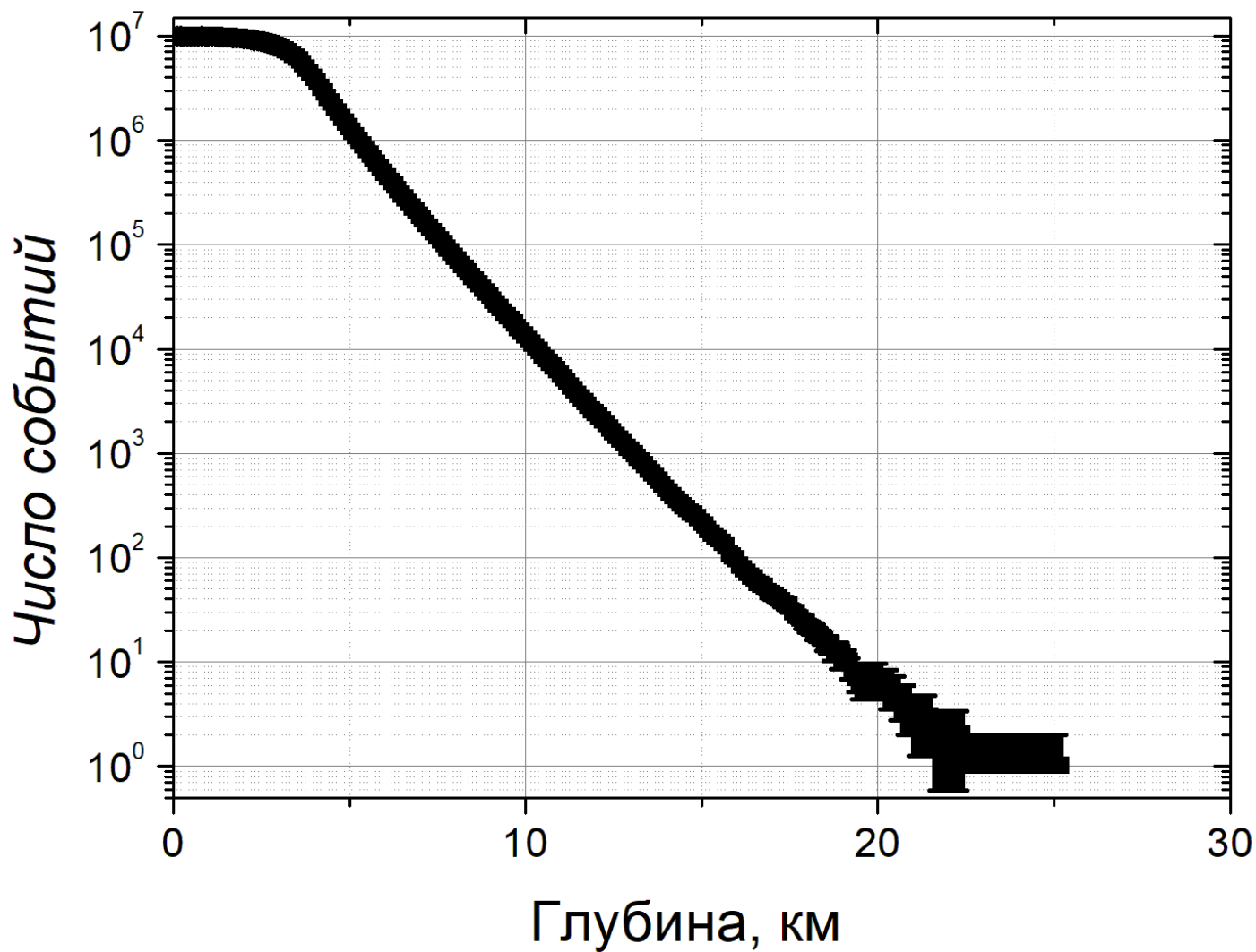


# Отношение спектра максимальных каскадов к спектру всех каскадов на глубине 4.5 – 5.5 км

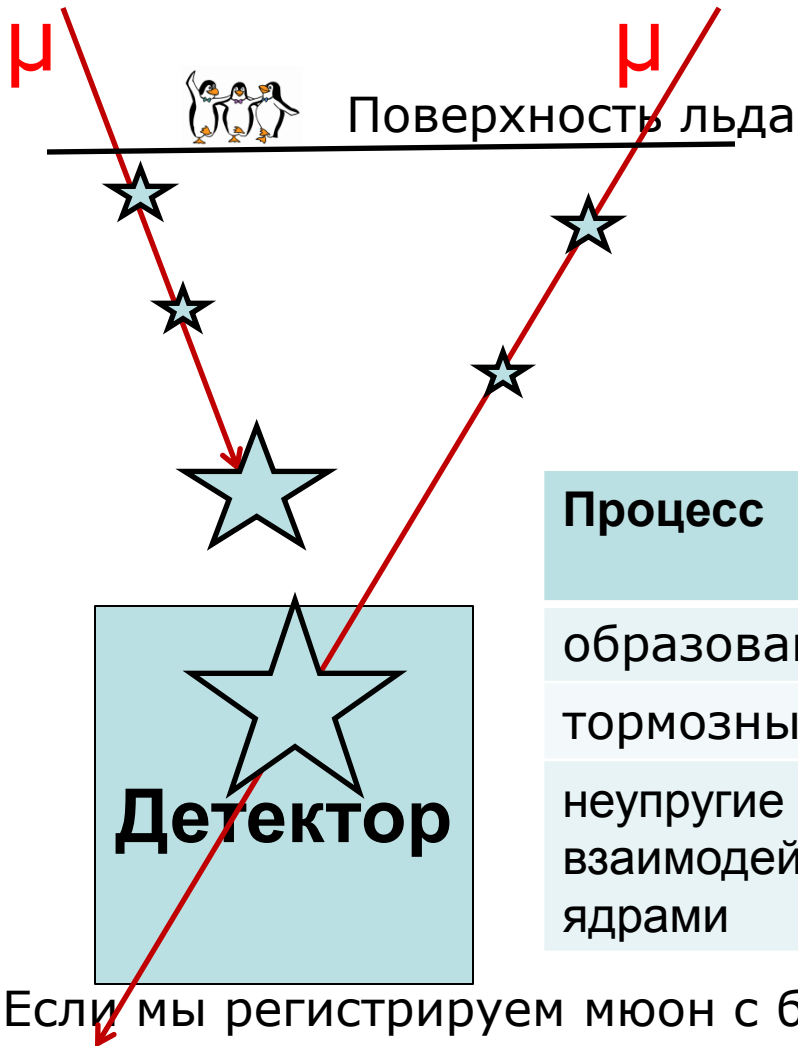


**Спектр максимальных каскадов при энергиях выше 3-5 ТэВ может быть использован для анализа спектра мюонов.** 9

# Поглощение мюонов ( $E_0 > 2$ ТэВ, $\gamma = 3.7$ )



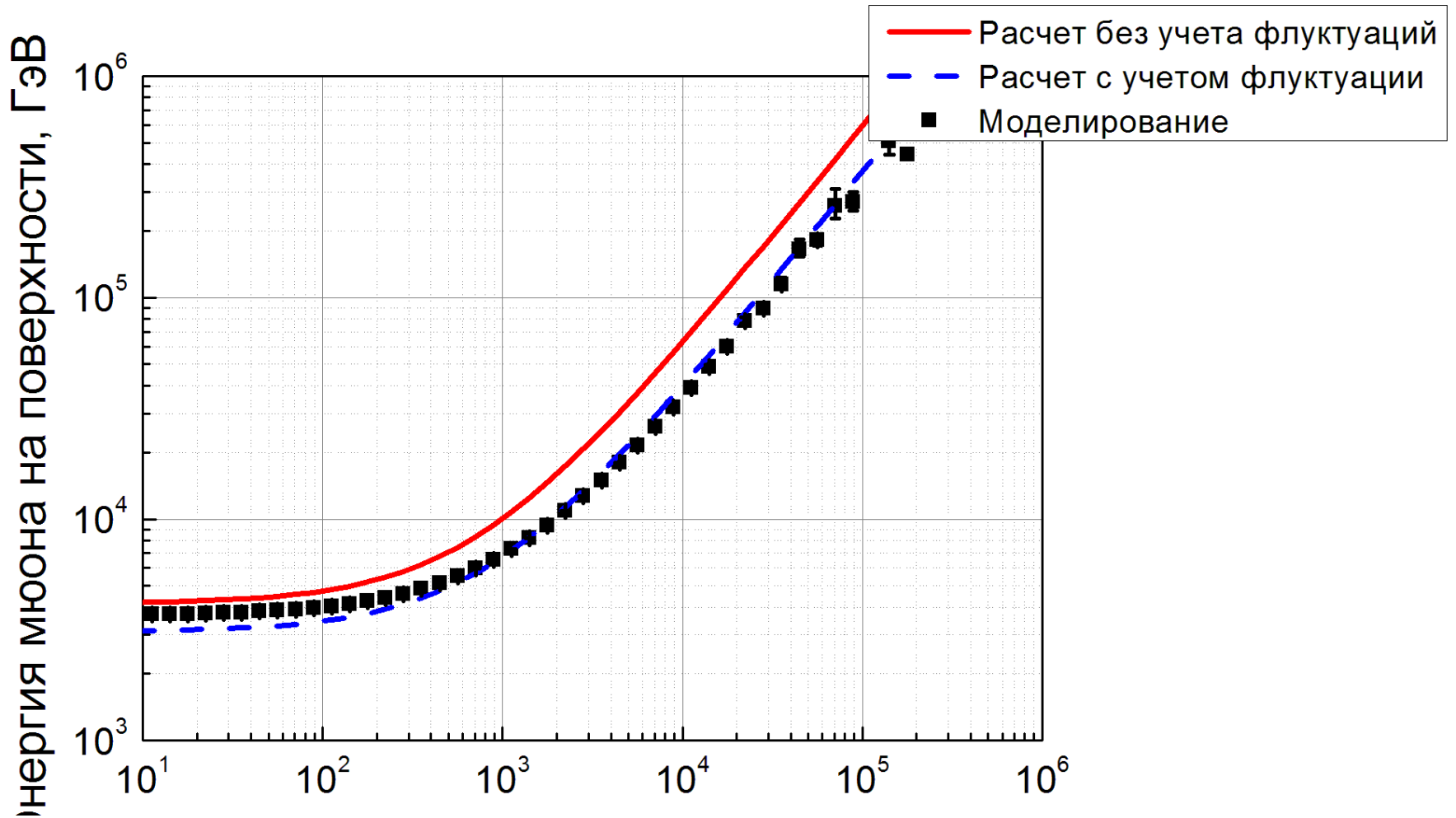
# Влияние флуктуаций потерь энергии мюонов



Процесс	Переданная Энергия $V$	Флуктуации
образование пар	$10^{-3} - 10^{-2}$	малые
тормозные потери	$10^{-2} - 1$	большие
неупругие взаимодействия с ядрами	$10^{-2} - 1$	большие

Если мы регистрируем мюон с большим каскадом в объеме детектора, весьма вероятно, что этот мюон не генерировал больших каскадов над детектором. Таким образом мы можем переоценить энергию мюона на поверхности.

# Связь энергии мюонов на поверхности и на глубине 5 км ( $E_0 > 2$ ТэВ, $\gamma = 3.7$ )



# Заключение

- **Разработана программа для моделирования спектра VHE мюонов на больших глубинах.**
- **Предварительное моделирование показало, что спектр максимальных каскадов с энергиями выше 3-5 ТэВ может быть использован для оценки спектра мюонов.**
- **Моделирование подтвердило, что при расчете спектра мюонов на больших глубинах необходимо учитывать флуктуации в потерях энергии мюонов.**

**Спасибо за внимание!**