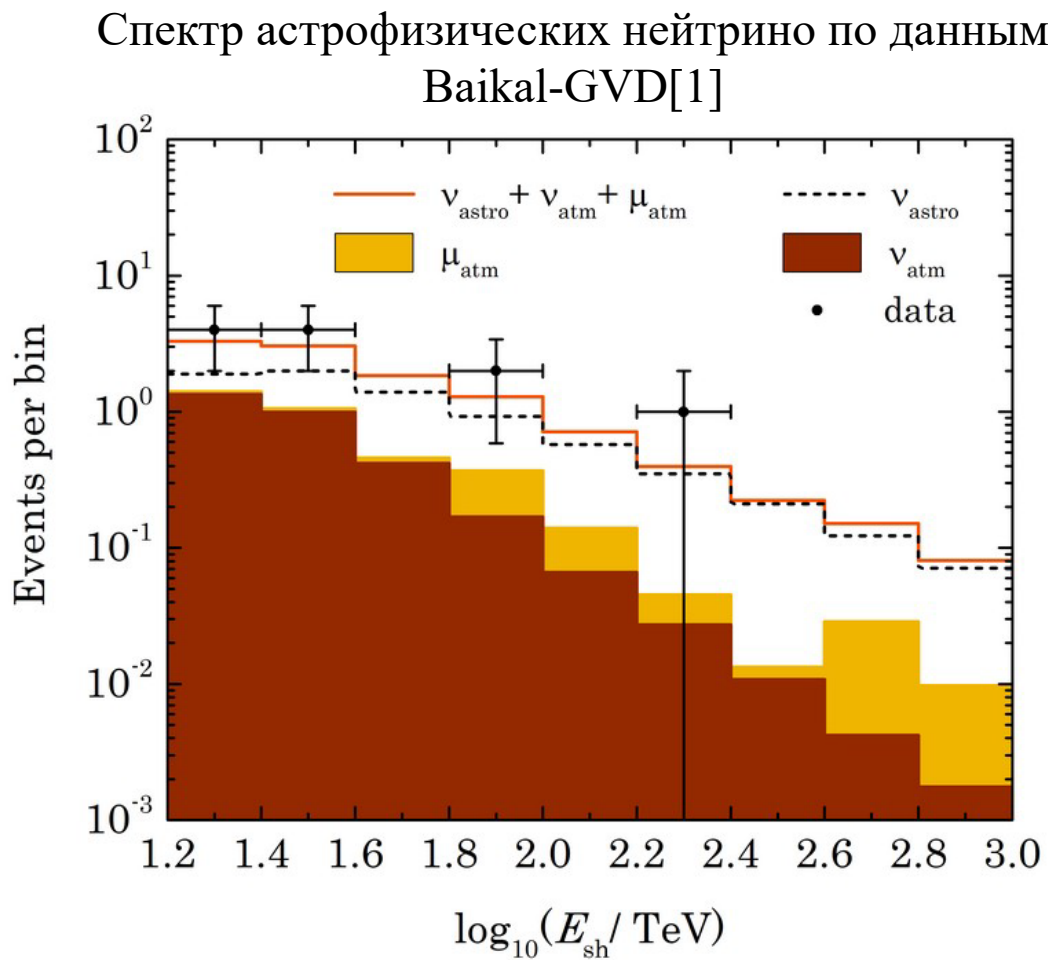


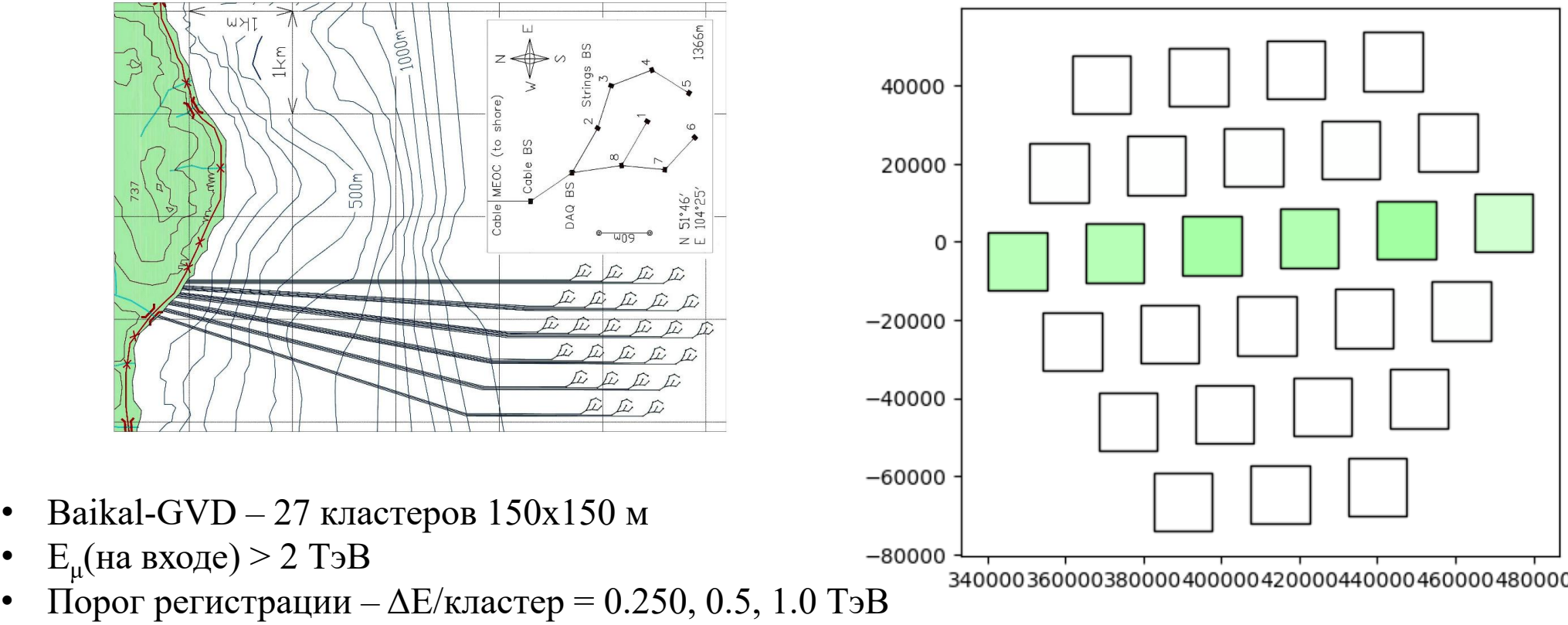
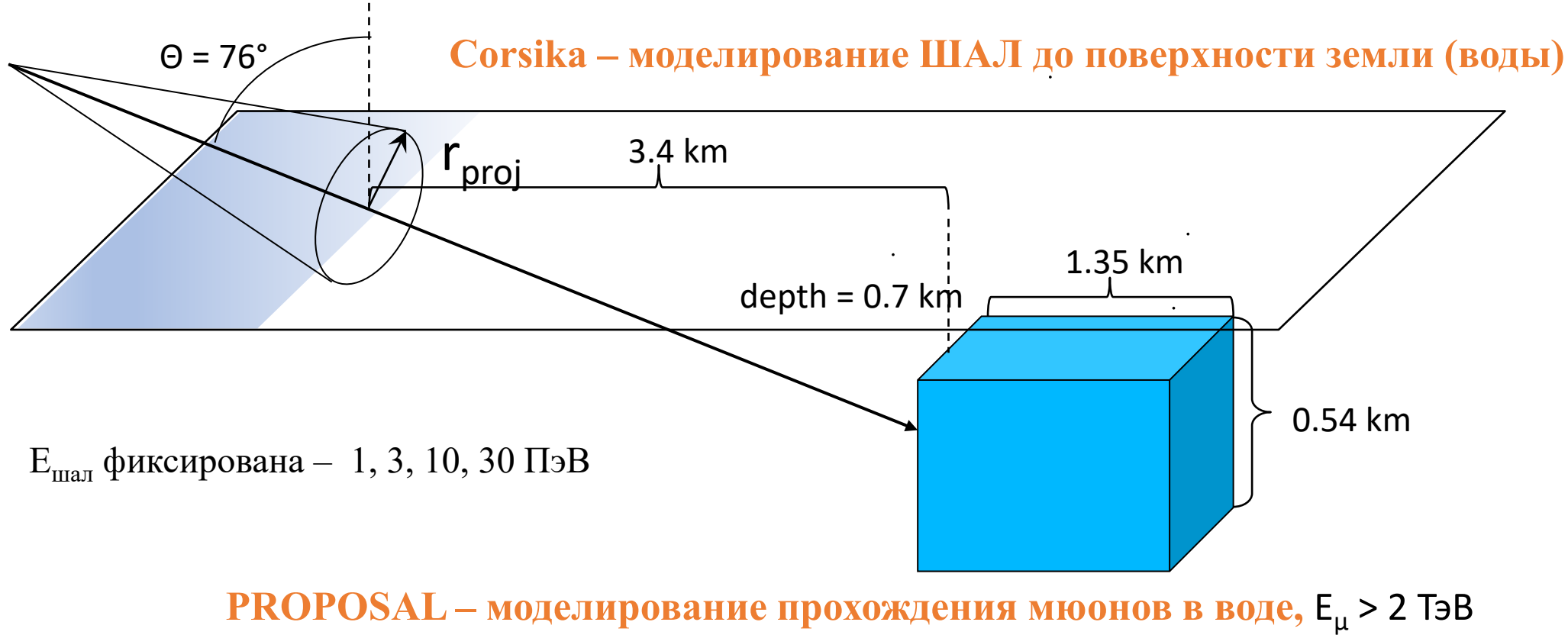


Мотивация

- Исследование нейтрино высокой энергии (> 1 ТэВ) проводятся на 3-х установках: IceCube, KM3Net, Baikal-GVD.
- Атмосферные нейтрино (рожденные ШАЛ) являются основным, неустранимым фоном при регистрации астрофизических нейтрино.
- Расчет (моделирование) потока атмосферных нейтрино является важной задачей, определяющей достоверность регистрации астрофизических событий.
- Атмосферные нейтрино рождаются в основном в распадах мюонов и пионов (совместно с мюонами). Измерив поток атмосферных мюонов высокой энергии можно верифицировать поток атмосферных нейтрино сопоставимых энергий



Моделирование



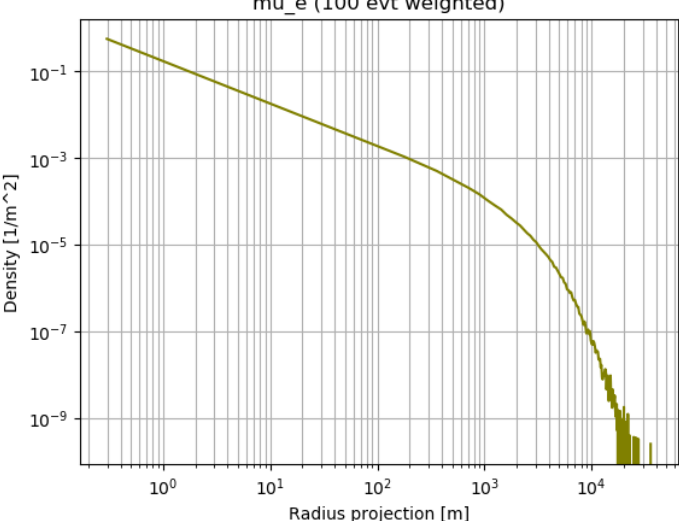
- Baikal-GVD – 27 кластеров 150x150 м
- E_mu(на входе) > 2 ТэВ
- Порог регистрации – ΔE/кластер = 0.250, 0.5, 1.0 ТэВ

Особенности регистрации наклонных ШАЛ

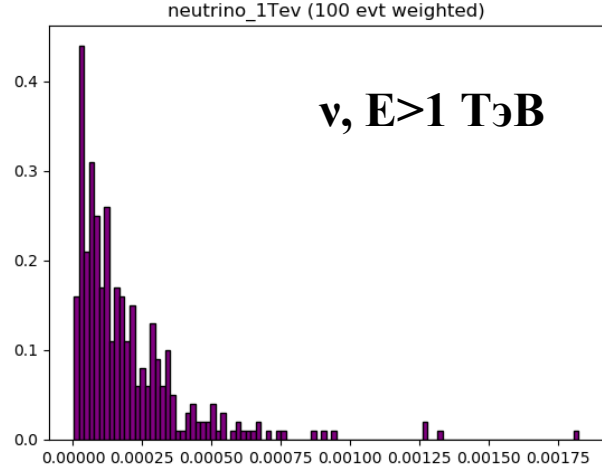
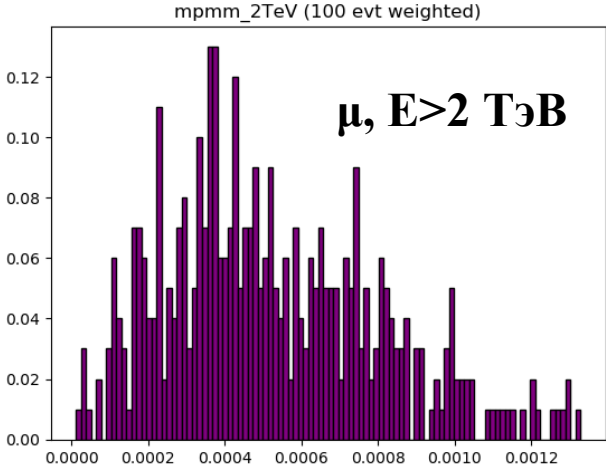
E_shal = 1 ПэВ

	0°	10°	20°	30°	40°	50°	60°	70°	76°	80°
Mu	11466	11342	9689	9347	7615	6738	4411	2497	1738	1179
Gamma	578947	691003	818929	243276	100989	34135	5712	2920	1672	1177
Neutrino	25783	24265	20333	26646	25843	28496	26712	24700	23715	20564
e+e-	104360	129039	160025	43222	17409	6183	1170	655	375	271
Rpr_mu(50%),м	273	257	248	313	357	406	511	798	1220	1958
Rpr_gamma(50%), м	74	66	55	84	101	128	399	513	1057	1532
Rpr_v(50%), м	626	585	579	841	1017	1306	1868	3229	4615	6800
Rpr_e+e-(50%), м	38	34	28	42	53	73	376	505	1079	1515

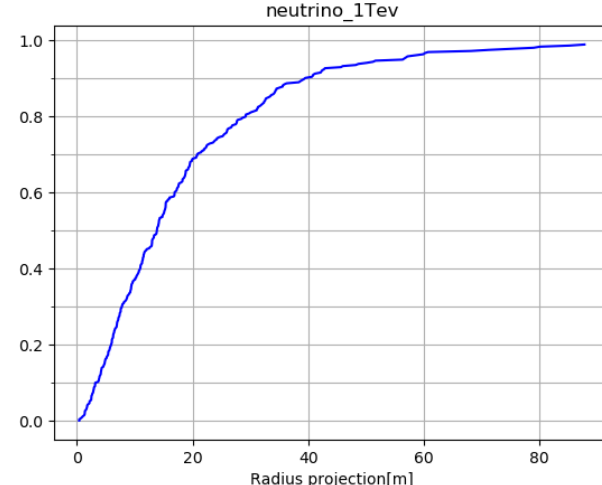
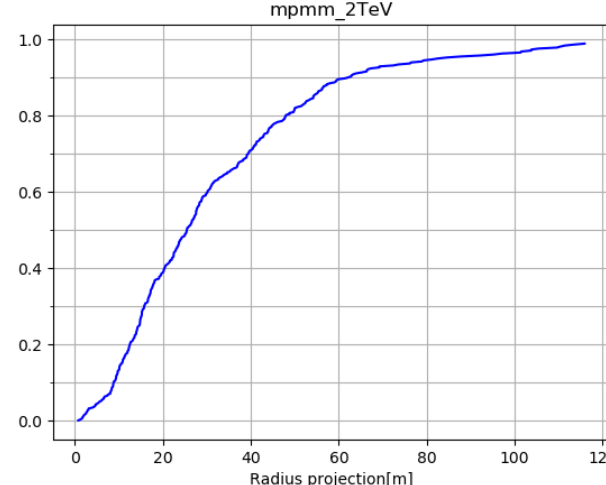
Плотность частиц на поверхности,
μ + e+e-, E > 10 МэВ.



Углы отклонения от оси ливня



Характерное отклонение от оси ливня

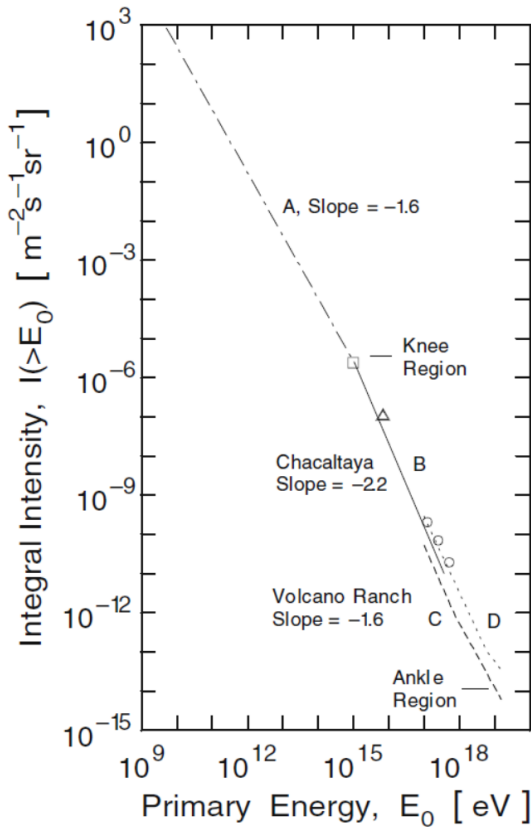


Принцип регистрации ШАЛ:

- Плотный детектирующий кластер
- Ось и направление ШАЛ восстанавливается по мюону(нейтрино) в ГВД
- Площадь регистрации ШАЛ → π · (100 м)² = 31415 м²
- Оценка регистрирующей площади установки – минимальное необходимое число зарегистрированных заряженных частиц 3 →
S_det = 3 / Density(R=100 м) = 3 / 1.8 · 10⁻³ = 1660 м²
- Телесный угол задается ГВД, Ω = 0.54 · 1.35 / 4.0² = 0.046

Ешал	1 ПэВ	3 ПэВ	10 ПэВ	30 ПэВ
Плотность μ + e+e- (R=100 м)	1.80E-03	4.80E-03	1.35E-02	0.039
Sdet, m ²	1667	625	222	77
J, поток ПКЛ при E>Eп (шт/(м2 сек ср)) [2]	3.00E-06	2.60E-07	2.30E-08	2.00E-09
Nшал/год	140000	12000	1050	91

Интегральный поток ПКЛ [2]

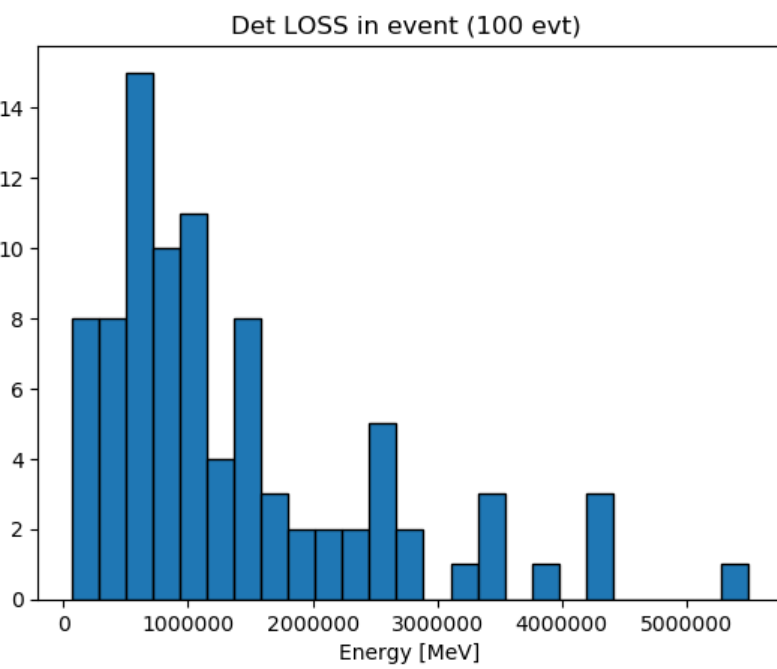


Заключение

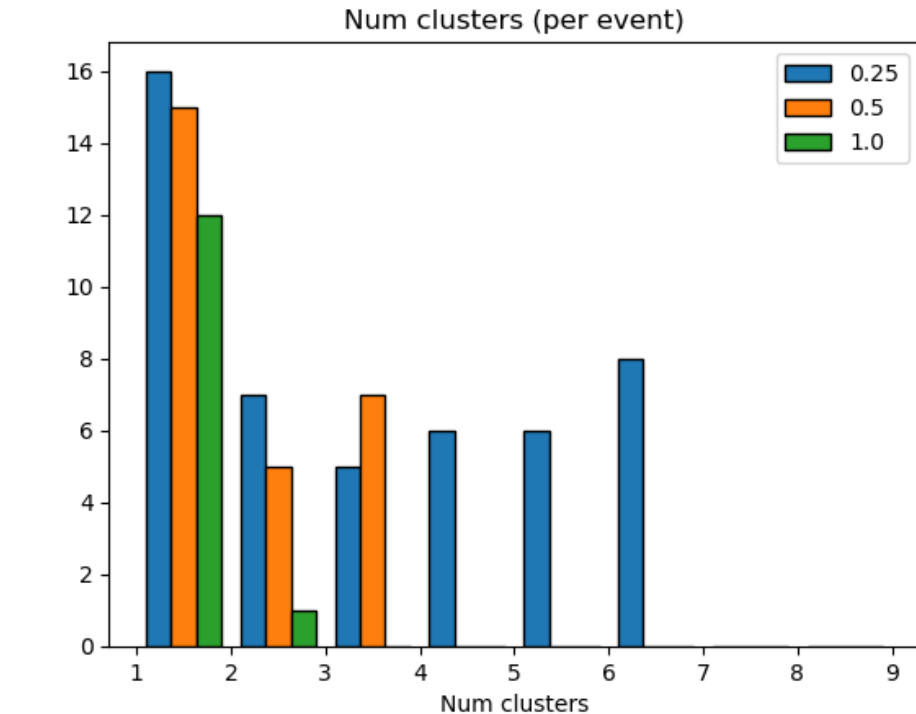
Регистрация наклонных ШАЛ одновременно с Baikal-GVD возможна. Для этого необходима установка с площадью регистрации частиц 100—500 м². Число зарегистрированных совместных событий составит от 100 до 10000 событий в год.

Совместная регистрация ШАЛ + μ(ν?) в Baikal-GVD

Потери энергии в ГВД на событие,
Ешал = 1 ПэВ



Число сработавших кластеров в ГВД
при разных порогах, Ешал = 1 ПэВ

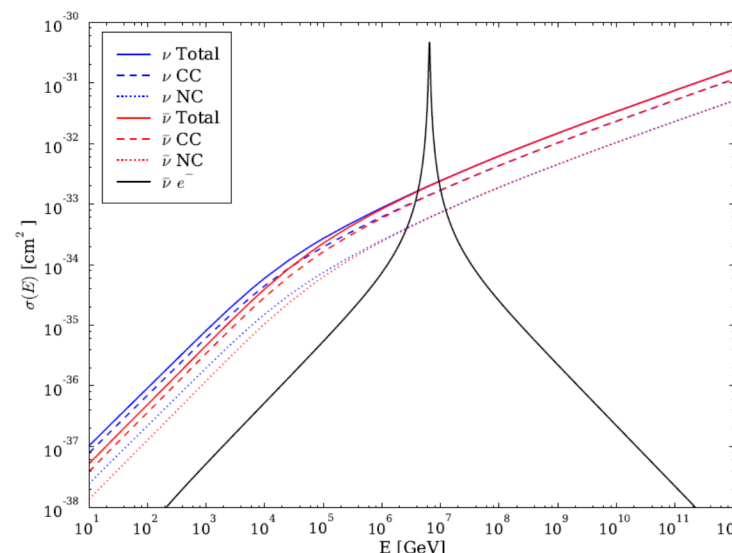


Ешал	1 ПэВ	3 ПэВ	10 ПэВ	30 ПэВ
Sdet, m²	1667	625	222	77
Nшал/год	140000	12000	1050	91
Nμ(E>2ТэВ)/шал	3.9	9.2	23.2	54.7
Эффективность ГВД (≥1 кластер с ΔE>0.25 ТэВ), %	48	87	100	100
Эффективность ГВД (≥1 кластер с ΔE>0.5 ТэВ), %	27	63	98	100
Эффективность ГВД (≥1 кластер с ΔE>1 ТэВ), %	13	26	82	100
Nшал+ГВД/год (≥1 кластер с ΔE>0.25 ТэВ)	66000	10000	1050	91
Nшал+ГВД/год (≥1 кластер с ΔE>0.5 ТэВ)	37000	7500	1020	91
Nшал+ГВД/год (≥1 кластер с ΔE>1 ТэВ)	18000	3000	860	91

Оценка числа событий с нейтрино при Ешал > 1 ПэВ:

- Число нейтрино в ШАЛ с E=1 ТэВ N_ν = 3.54
- Сечение взаимодействия 1.5 · 10⁻³⁵ см²/нуклон [3]
- ΔN/N = πσх = 6 · 10²³ · 1.5 · 10⁻³⁵ · 1.35 · 10⁵ = 1.2 · 10⁻⁶

• ΔN = 140000 · 3.54 · 1.2 · 10⁻⁶ = 0.6 события в год ☹



Благодарности

Работа выполнена при поддержке Министерства науки и высшего образования Российской Федерации в рамках государственного задания «Наука» по контракту 075-15-2024-54.

Литература

- V. A. Allakhverdyan *et al.* (Baikal-GVD Collaboration), *Diffuse neutrino flux measurements with the Baikal-GVD neutrino telescope*, Phys. Rev. D 107, 042005
- Peter K.F. Grieder *Extensive Air Showers*, Springer-Verlag Berlin Heidelberg 2010
- R. Gandhi, C. Quigg, M. H. Reno, and I. Sarcevic. *Ultrahigh-energy neutrino interactions*. Astropart. Phys., 5:81–110, 1996.