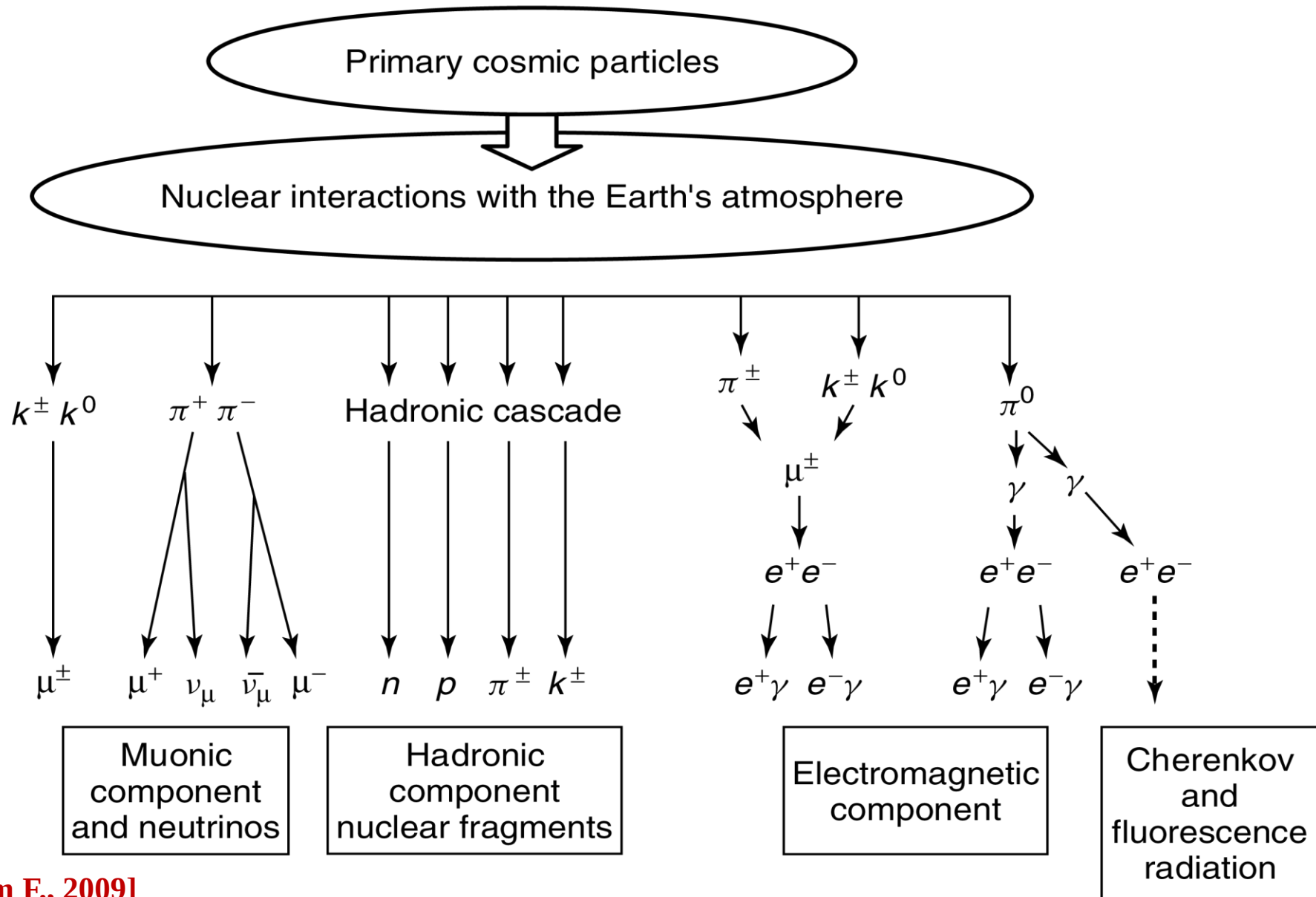

ОЦЕНКА СКОРОСТИ ИОНИЗАЦИИ АТМОСФЕРЫ ЗЕМЛИ ЧАСТИЦАМИ СОЛНЕЧНЫХ КОСМИЧЕСКИХ ЛУЧЕЙ И РАСЧЕТ ЭКВИВАЛЕНТНОЙ ДОЗЫ

Е.А. МАУРЧЕВ, Е.А. МИХАЛКО, А.В. ГЕРМАНЕНКО,
Ю.В. БАЛАБИН, Б.Б. ГВОЗДЕВСКИЙ



ВККЛ 2022, Россия, Москва

СХЕМАТИЧНАЯ ИЛЛЮСТРАЦИЯ РАСПРОСТРАНЕНИЯ КАСКАДА КОСМИЧЕСКИХ ЛУЧЕЙ В АТМОСФЕРЕ ЗЕМЛИ



GEANT4 SOFTWARE DEVELOPMENT TOOLKIT

GEANT4 11.0 (latest), constantly updated

НАБОРЫ ДАННЫХ

- Neutron data files (with thermal CS) [**G4NDL4.6**]
 - Low energy electromagnetic processes [**G4EMLOW8.0**]
 - Photon evaporation [**G4PhotonEvaporation5.7**]
 - Radioactive decay [**G4RadioactiveDecay5.6**]
 - Evaluated cross-sections [**G4SAIDDATA2.0**]
 - Evaluated particle cross-sections on natural composition of elements [**G4PARTICLEXS4.0**]
 - Nuclear shell effects in INCL/ABLA hadronic mode [**G4ABLA3.1**]
 - Proton and neutron density profiles in INCL [**G4INCL1.0**]
 - Shell ionization cross-sections [**G4PII1.3**]
 - Nuclides properties [**G4ENSDFSTATE2.3**]
- [https://geant4.web.cern.ch/support/data_files_citations]

МОДЕЛИ ВЗАИМОДЕЙСТВИЙ

- The quark-gluon string Parton model (for hadrons $E > 10$ GeV) [[Amelin et al., 2001](#)]
- The Bertini cascades (for hadrons $E < 10$ GeV) [[Heikkinen et al., 2003](#)]
- The low-energy neutron interactions model ($E < 20$ MeV) [[Garny et al., 2009](#)]

СОБСТВЕННЫЕ МОДУЛИ

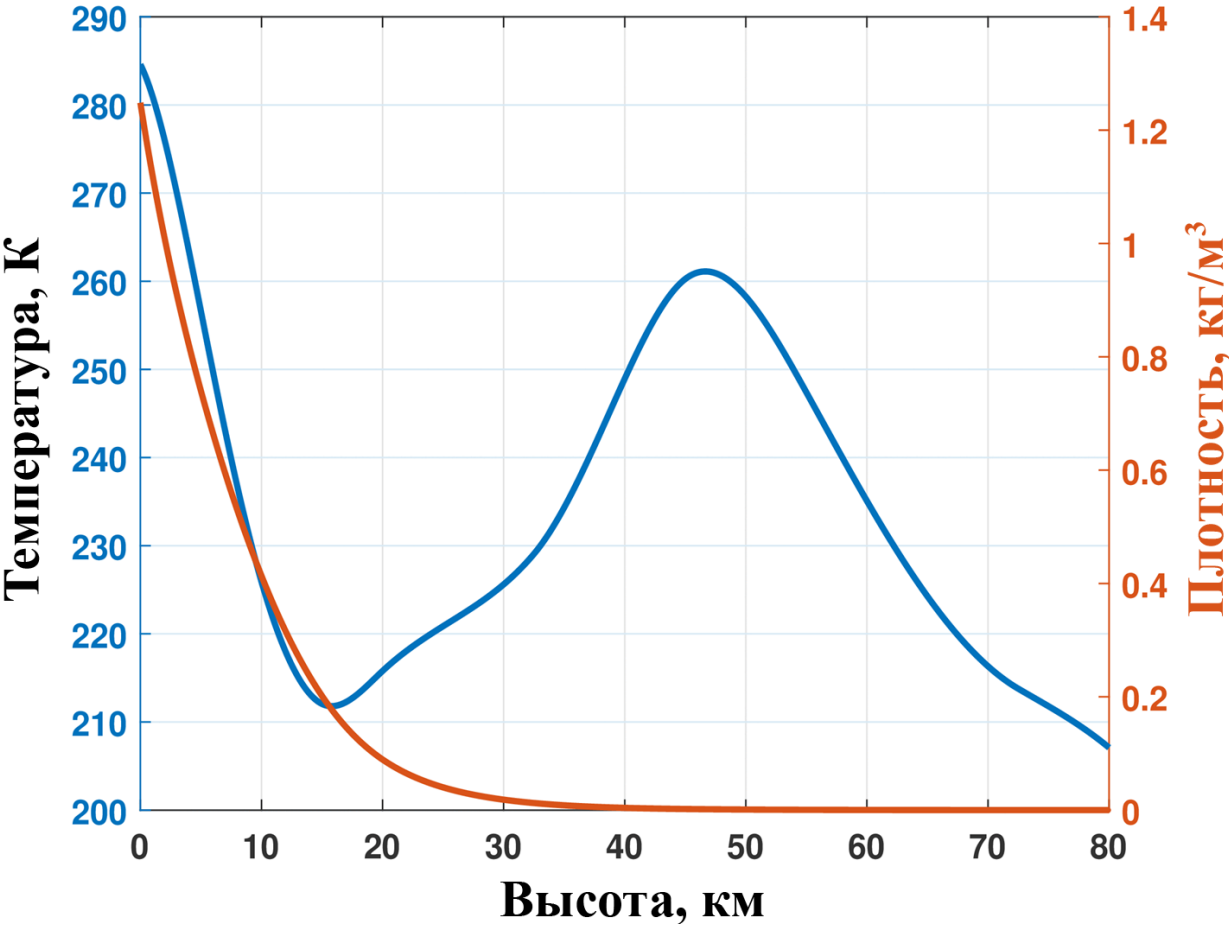
- Генератор первичных частиц
- Геометрия
- Детектор угловых распределений
- Энергетический спектр
- Ионизация
- Суммарный поток

[<https://geant4.web.cern.ch/>]

NRLMSISE-00 – В ОСНОВЕ ПАРМЕТРИЗАЦИИ ГЕОМЕТРИИ

H, km	T, K	ρ , kg/m ³	He, %	O, %	N, %	Ar, %
0,00	263,17	1,31	5,24E-04	2,10E+01	7,81E+01	9,34E-01
0,10	262,89	1,30	5,24E-04	2,10E+01	7,81E+01	9,34E-01
0,20	262,59	1,28	5,24E-04	2,10E+01	7,81E+01	9,34E-01
0,30	262,27	1,27	5,24E-04	2,10E+01	7,81E+01	9,34E-01
0,40	261,94	1,25	5,24E-04	2,10E+01	7,81E+01	9,34E-01
0,50	261,59	1,24	5,24E-04	2,10E+01	7,81E+01	9,34E-01
0,60	261,22	1,22	5,24E-04	2,10E+01	7,81E+01	9,34E-01
0,70	260,84	1,21	5,24E-04	2,10E+01	7,81E+01	9,34E-01
0,80	260,45	1,20	5,24E-04	2,10E+01	7,81E+01	9,34E-01
0,90	260,04	1,18	5,24E-04	2,10E+01	7,81E+01	9,34E-01
1,00	259,62	1,17	5,24E-04	2,10E+01	7,81E+01	9,34E-01
1,10	259,18	1,16	5,24E-04	2,10E+01	7,81E+01	9,34E-01
1,20	258,74	1,14	5,24E-04	2,10E+01	7,81E+01	9,34E-01
1,30	258,28	1,13	5,24E-04	2,10E+01	7,81E+01	9,34E-01
1,40	257,81	1,12	5,24E-04	2,10E+01	7,81E+01	9,34E-01
1,50	257,33	1,10	5,24E-04	2,10E+01	7,81E+01	9,34E-01
1,60	256,83	1,09	5,24E-04	2,10E+01	7,81E+01	9,34E-01
...	...	...	...	...	...	...

Пример части файла выходных данных модели NRLMSISE (зависимость температуры, плотности и процентного содержания элементов)

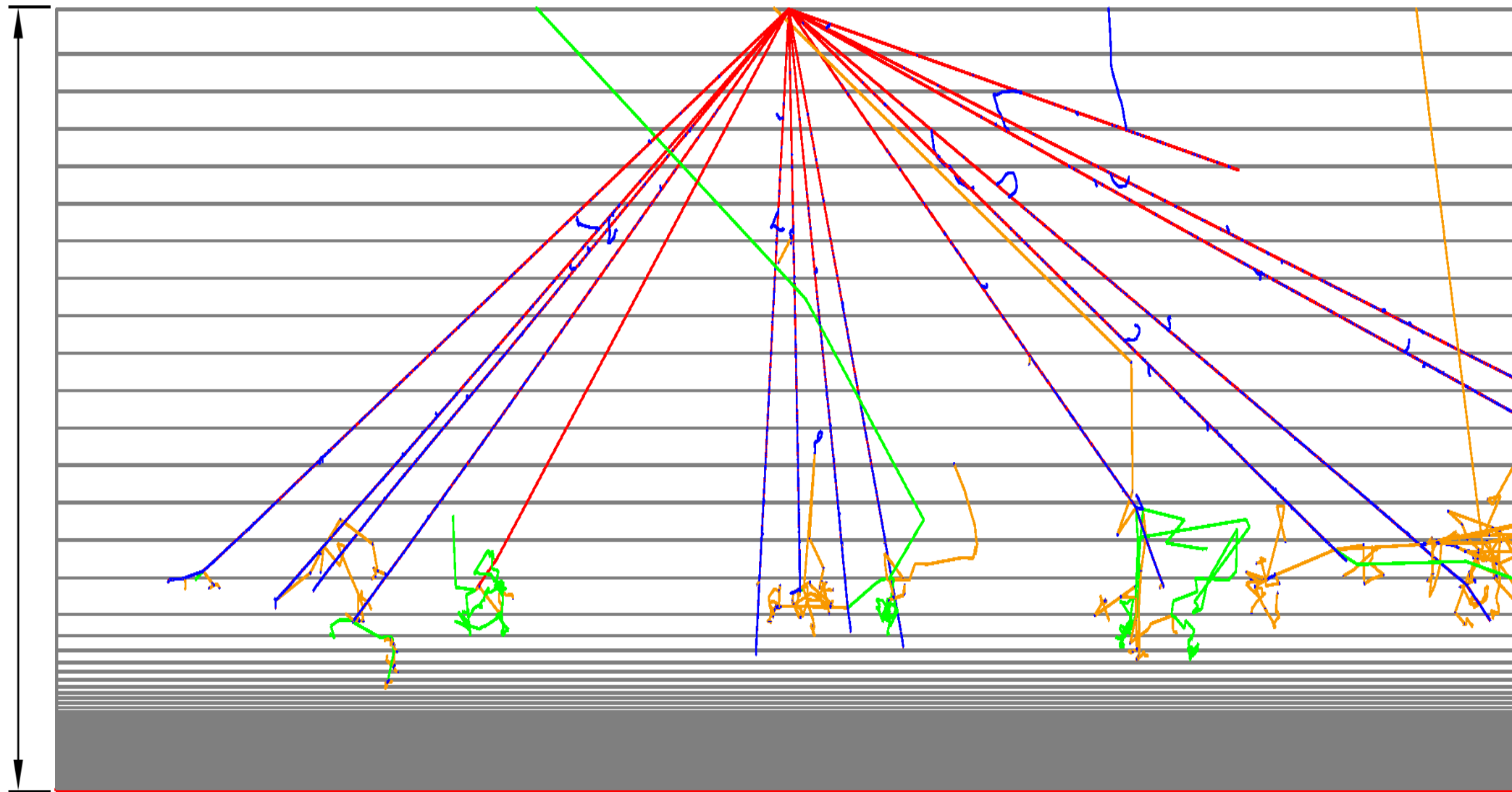


Графическое представление зависимости плотности и температуры от высоты, полученные в результате работы модели NRLMSISE

ТРЕКИНГ ПРОТОНОВ С ЭНЕРГИЕЙ 400 МЭВ ЧЕРЕЗ АТМОСФЕРУ ЗЕМЛИ

ИСТОЧНИК ЧАСТИЦ

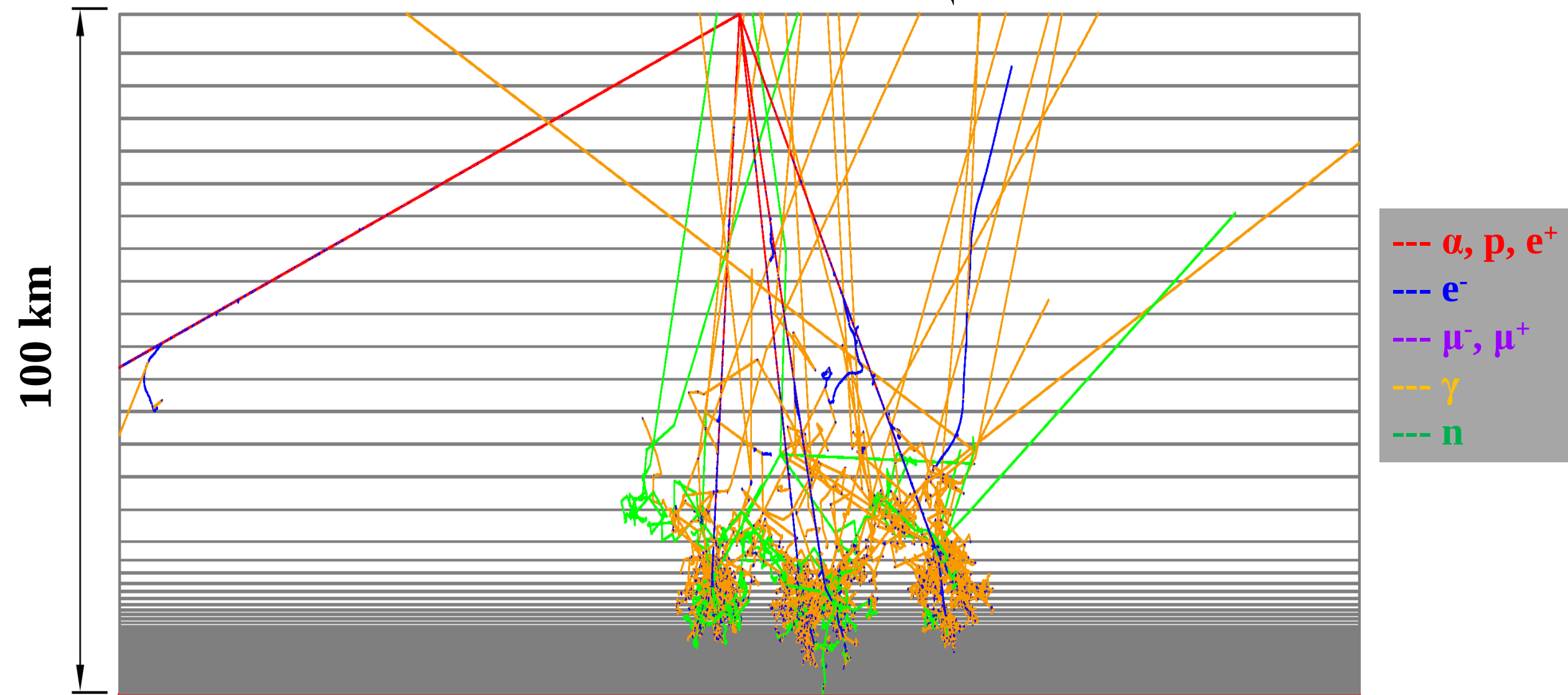
100 km



- α , p , e^+
- e^-
- μ^- , μ^+
- γ
- n

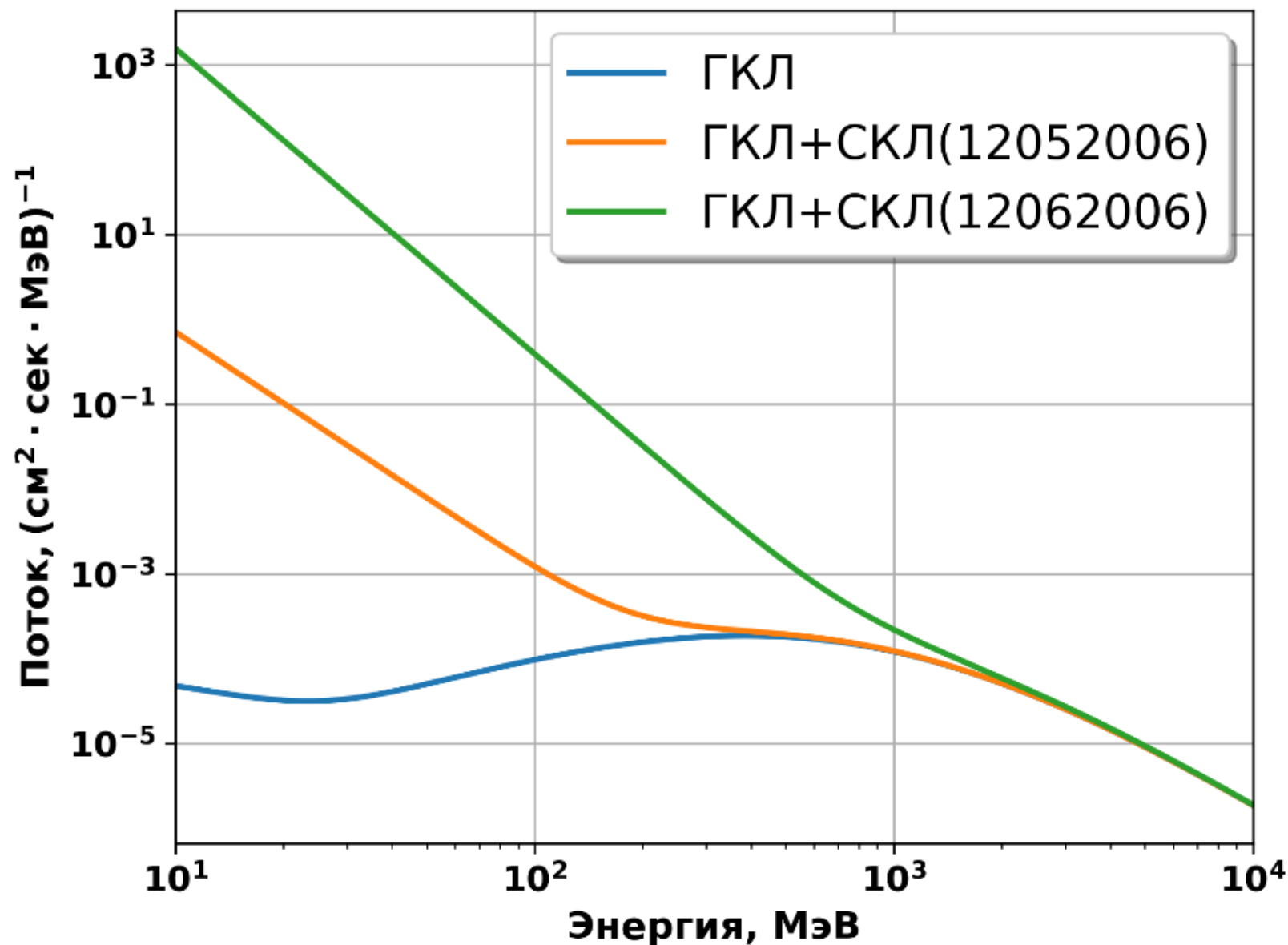
ТРЕКИНГ ПРОТОНОВ С ЭНЕРГИЕЙ 10 ГЭВ ЧЕРЕЗ АТМОСФЕРУ ЗЕМЛИ

ИСТОЧНИК ЧАСТИЦ



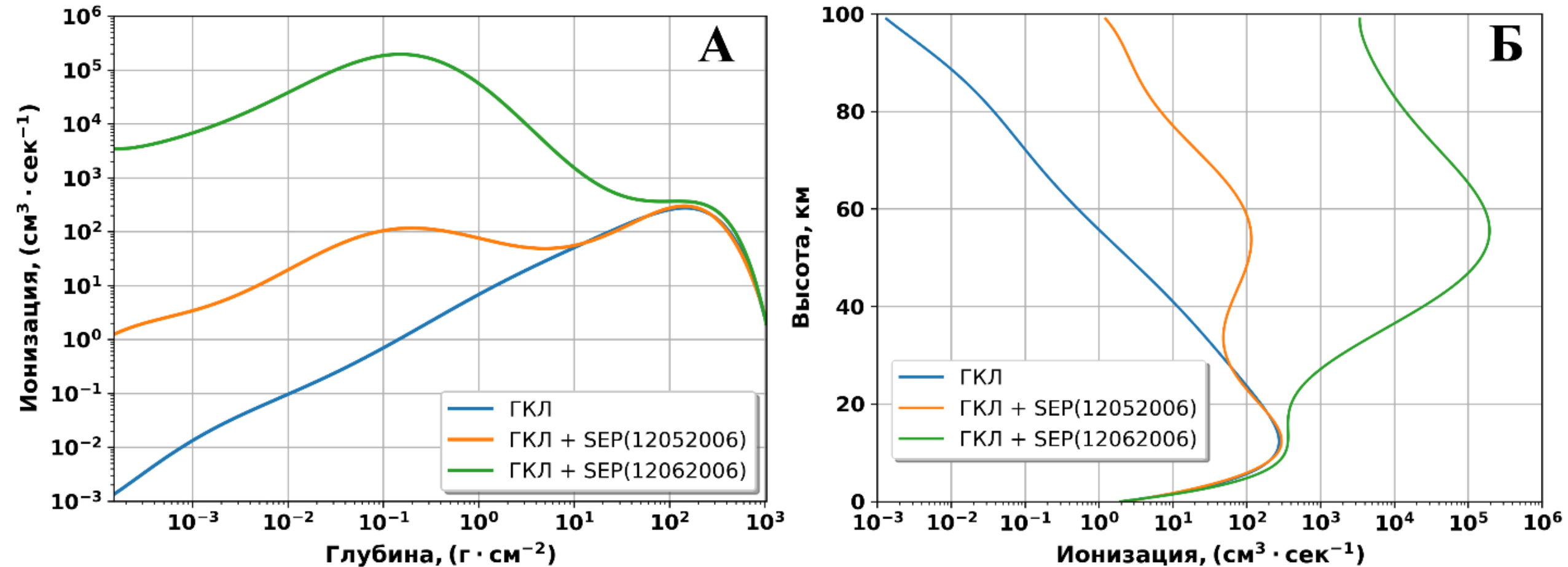
ПРИМЕР РАСЧЕТА СКОРОСТИ ИОНИЗАЦИИ ДЛЯ ГКЛ И SEP

СПЕКТР ПЕРВИЧНЫХ ПРОТОНОВ ($R = 0.135$ ГВ)



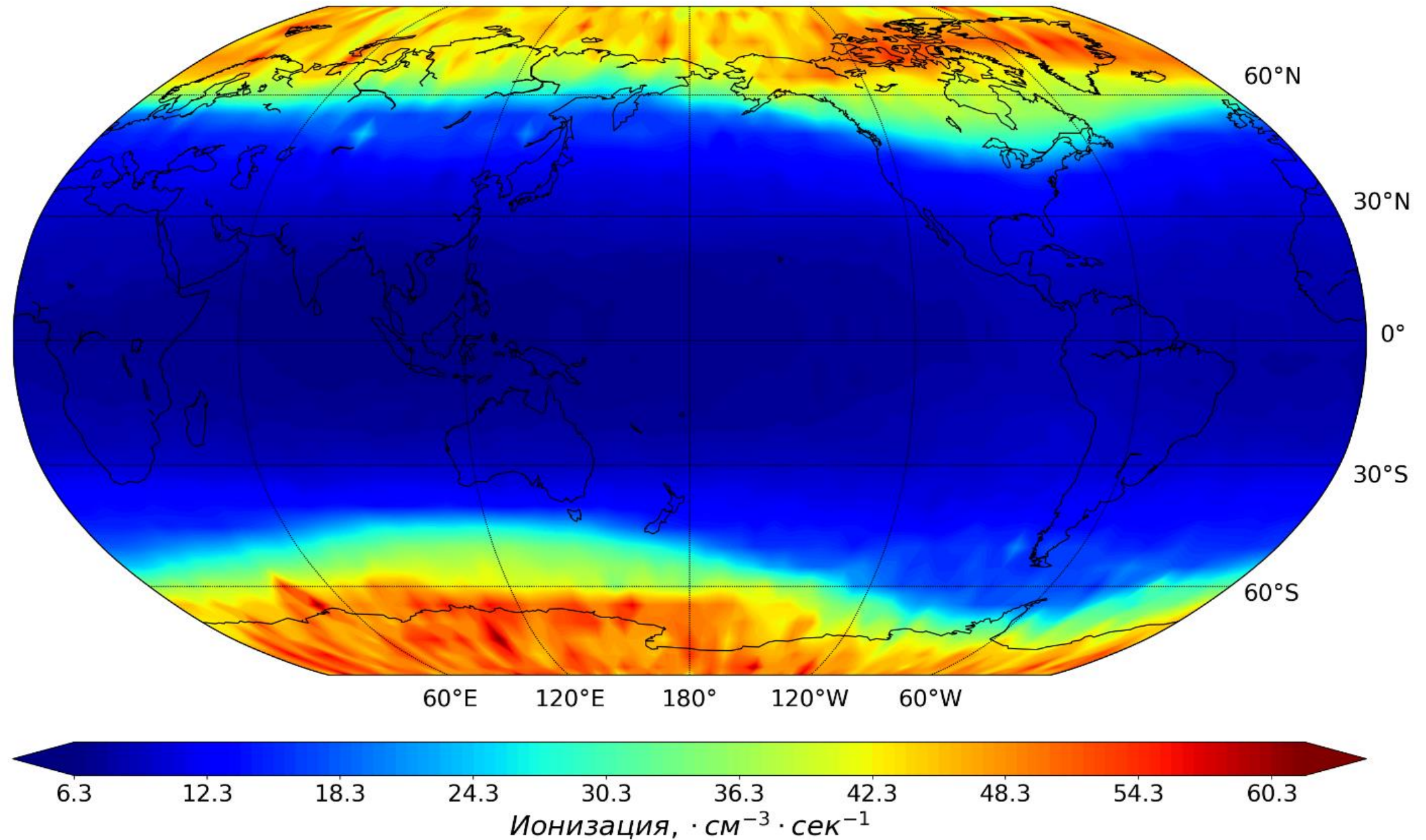
Спектры протонов первичных космических лучей, используемые в моделировании прохождения энергичных солнечных протонов через атмосферу Земли.

ПРИМЕР РАСЧЕТА СКОРОСТИ ИОНИЗАЦИИ ДЛЯ SEP



Профили ионизации в зависимости от глубины (А) и высоты (Б) полученные в результате моделирования прохождения протонов галактических космических лучей и солнечных космических лучей для событий 12.05.2006 г., 12.06.2006 г.

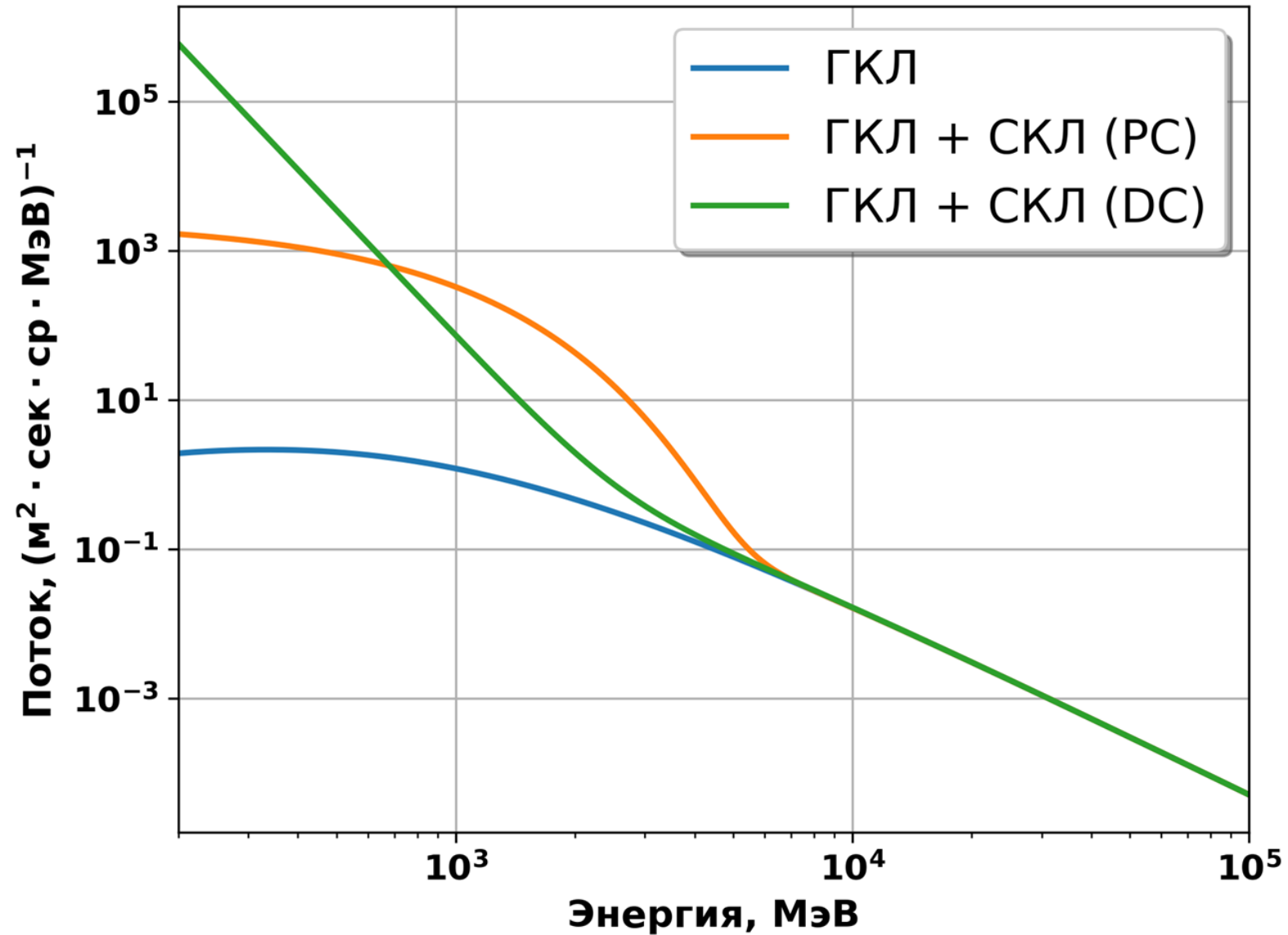
ПРИМЕР РАСЧЕТА СКОРОСТИ ИОНИЗАЦИИ ДЛЯ ГКЛ (5 КМ)



ПРИМЕР РАСЧЕТА ЭКВИВАЛЕНТНОЙ ДОЗЫ ДЛЯ ГКЛ И СКЛ

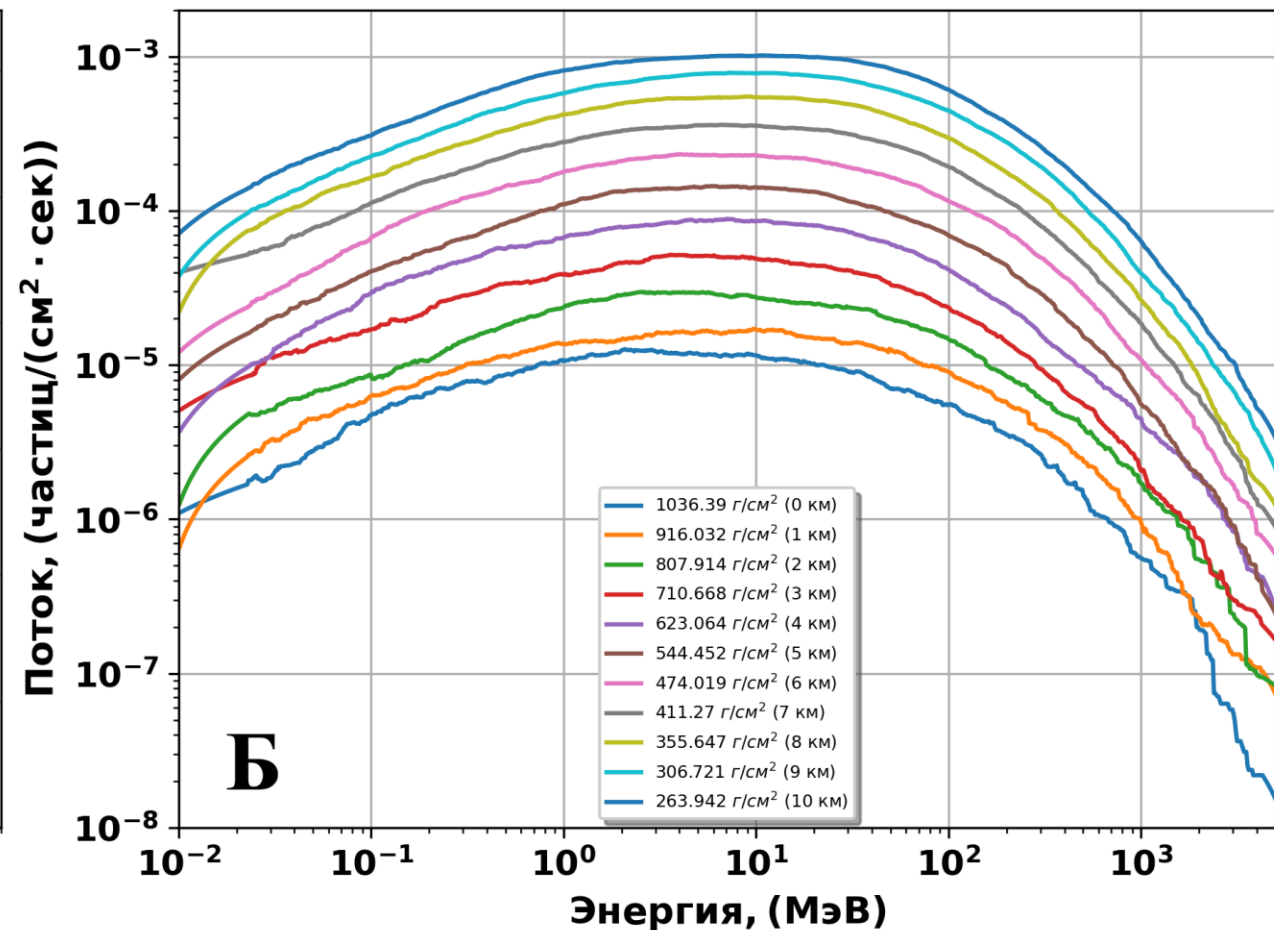
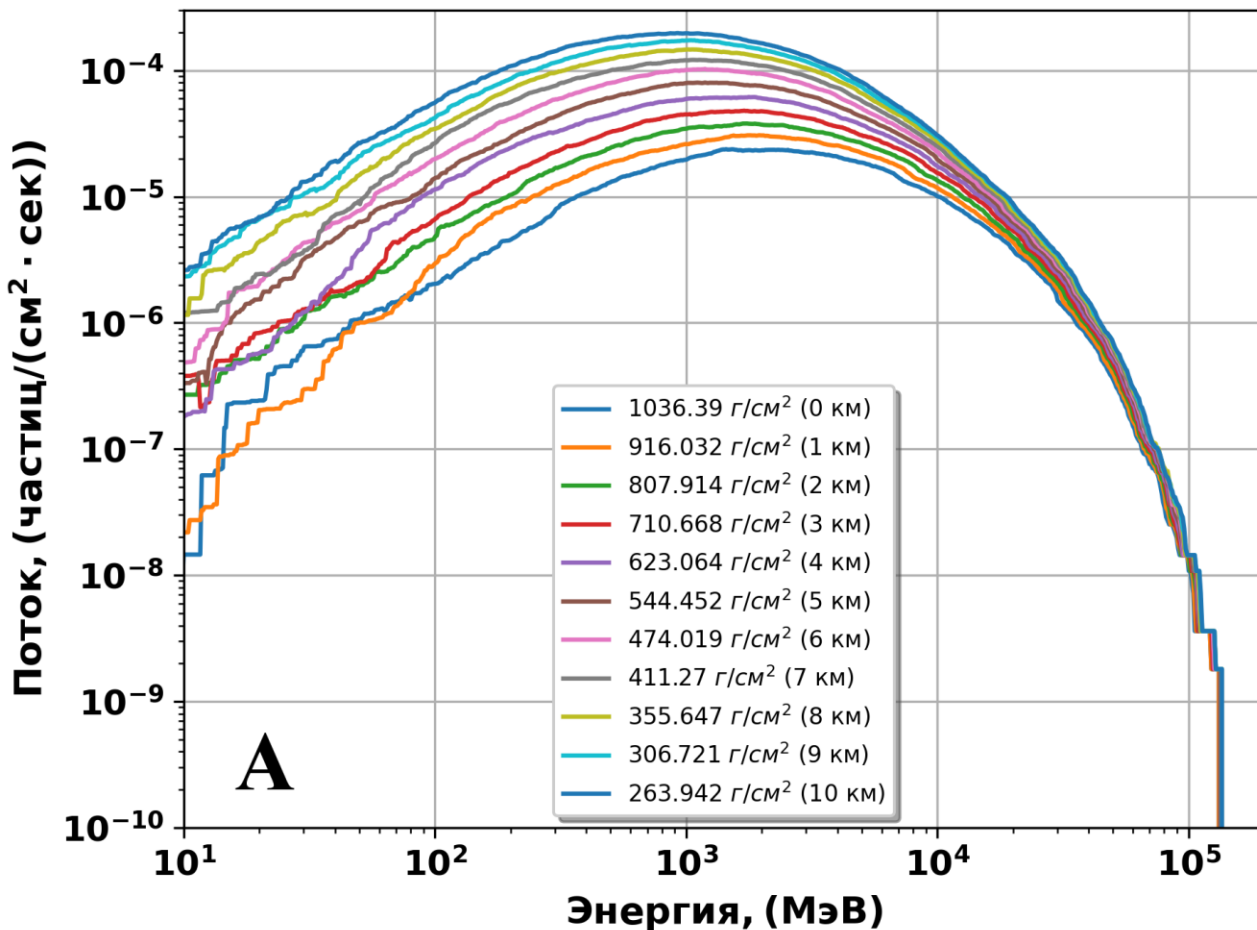
1. На заданных высотах при помощи модели прохождения КЛ через атмосферу Земли рассчитываются энергетические спектры вторичных частиц
2. Для каждого типа частиц определяется интегральный поток, который показывает, какое количество частиц прошло через единицу площади в единицу времени
3. После этого при помощи GEANT4 создается модель (объем воды ($0,065 \text{ м}^3$) в виде цилиндра массой $64,8 \text{ кг}$) с первичным источником, которому назначается спектральная характеристика рассматриваемого типа частиц. Производится запуск необходимого количества событий, определяется количество энергии, оставленной в единице объема, и производится пересчет на массу.

СПЕКТР ПЕРВИЧНЫХ ПРОТОНОВ ($R = 0,65$ ГВ)



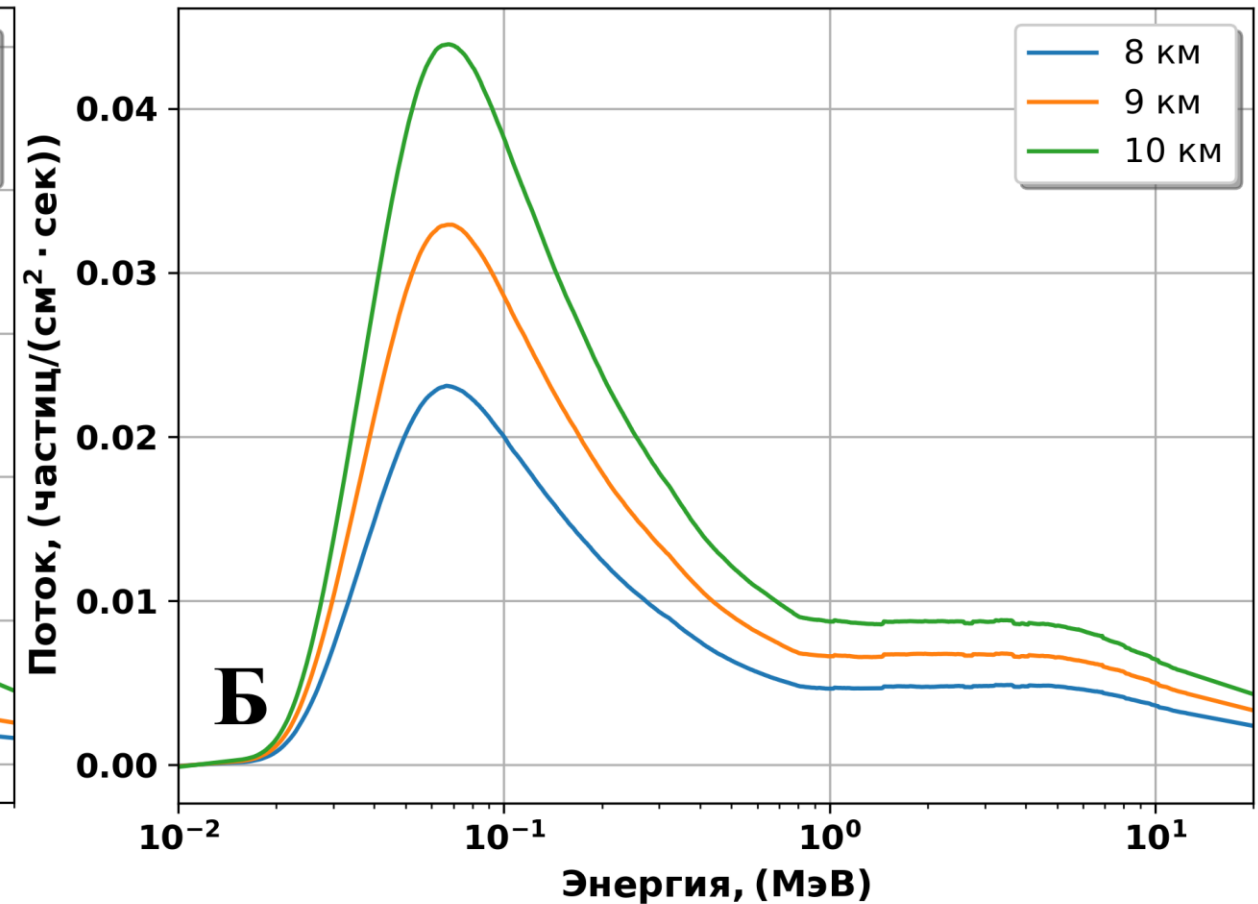
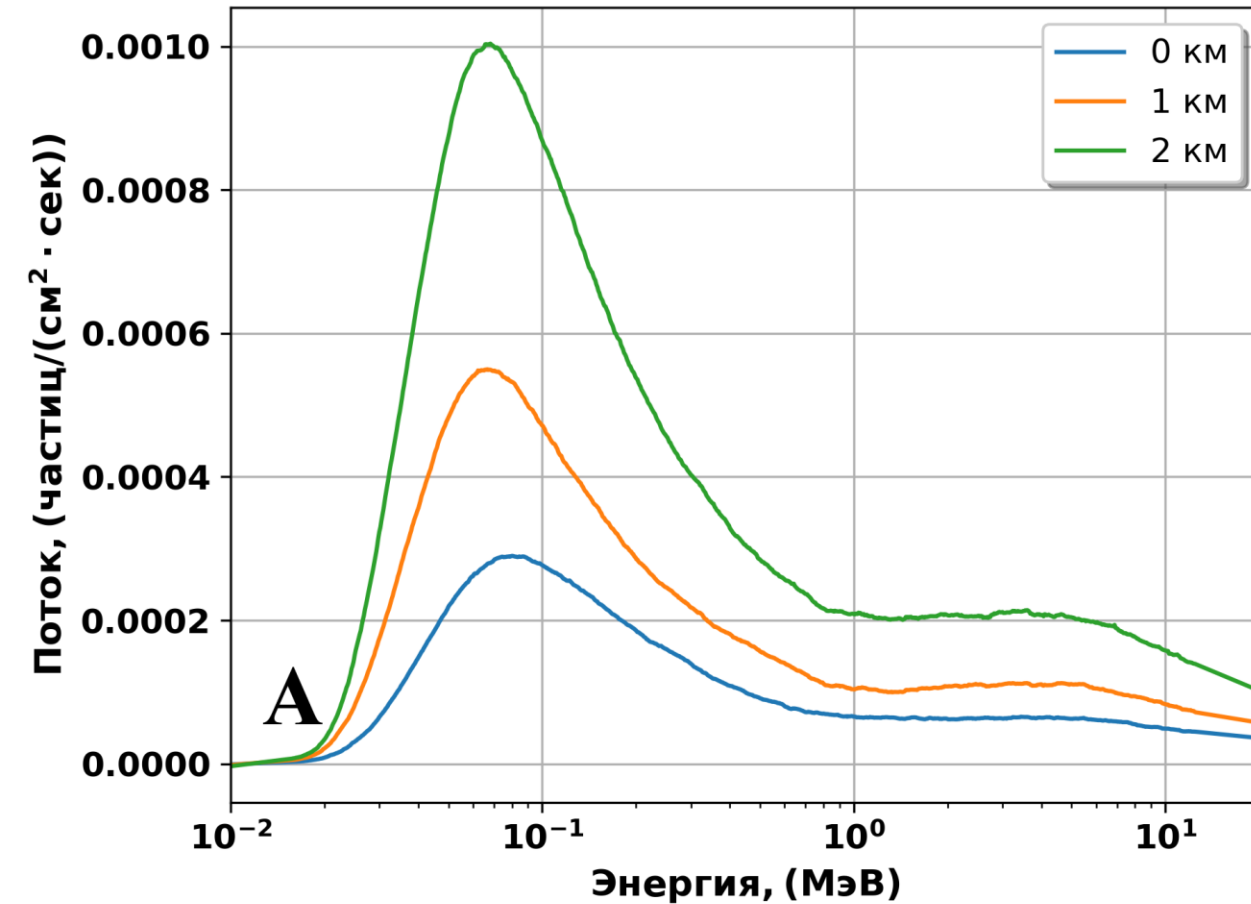
Энергетические спектры СКЛ, полученные при помощи данных сети станций нейтронных мониторов во время события GLE №69 в сравнении со спектром ГКЛ.

РАСЧЕТНЫЕ СПЕКТРЫ МЮОНОВ В АТМОСФЕРЕ ЗЕМЛИ



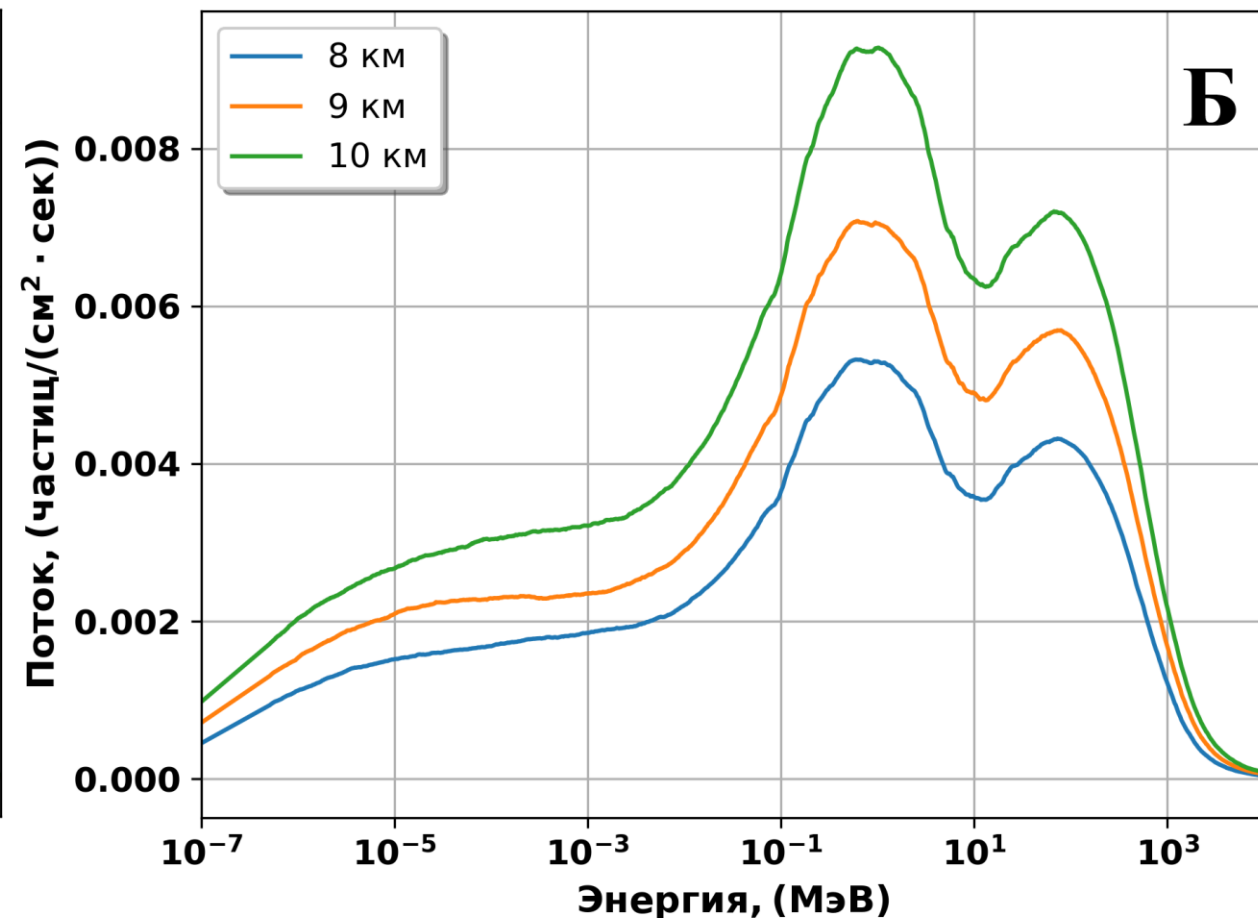
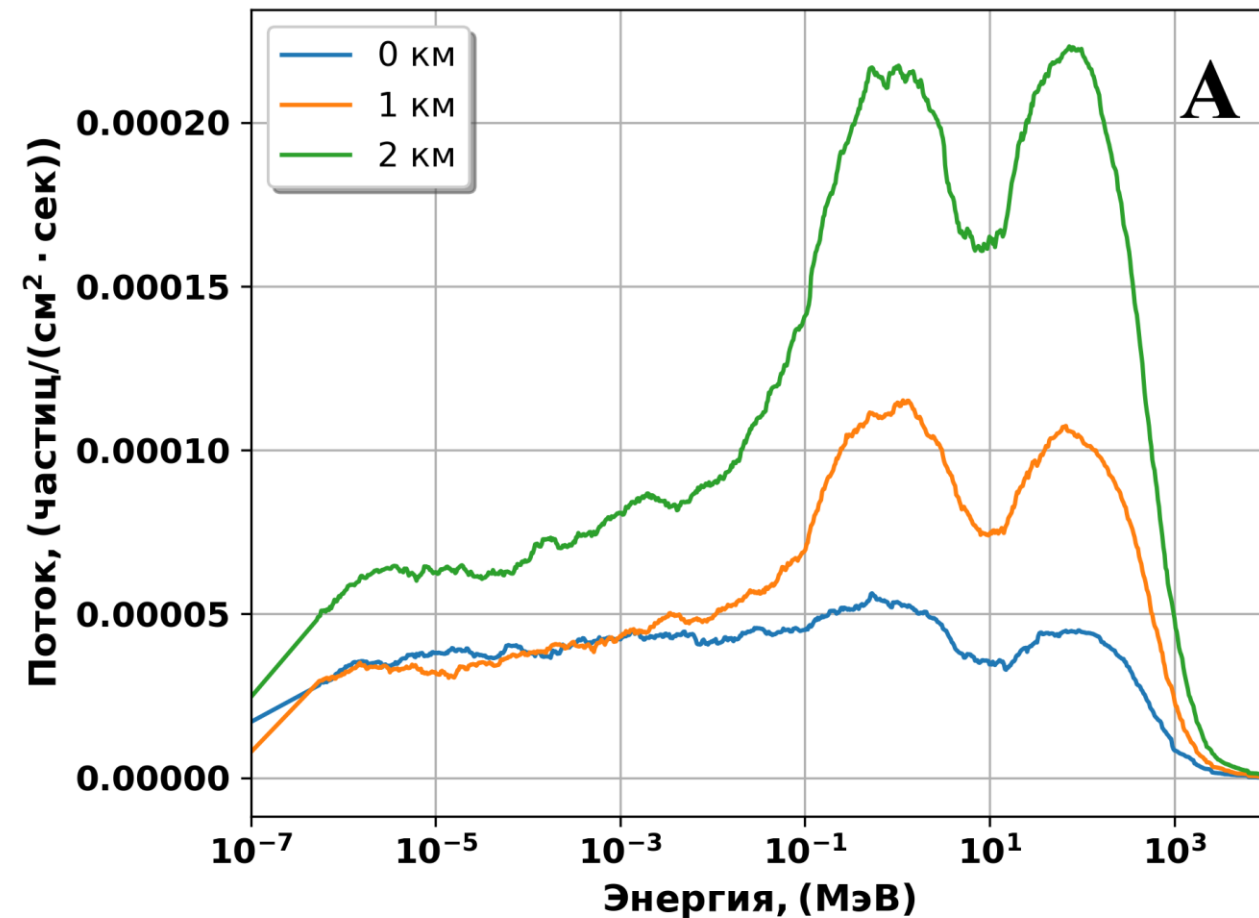
Энергетические спектры вторичных мюонов (А) и электронов (Б) на разных глубинах (высотах), полученные в результате моделирования прохождения протонов с энергетическими характеристиками, соответствующими спектру ГКЛ, через атмосферу Земли.

РАСЧЕТНЫЕ СПЕКТРЫ ФОТОНОВ В АТМОСФЕРЕ ЗЕМЛИ



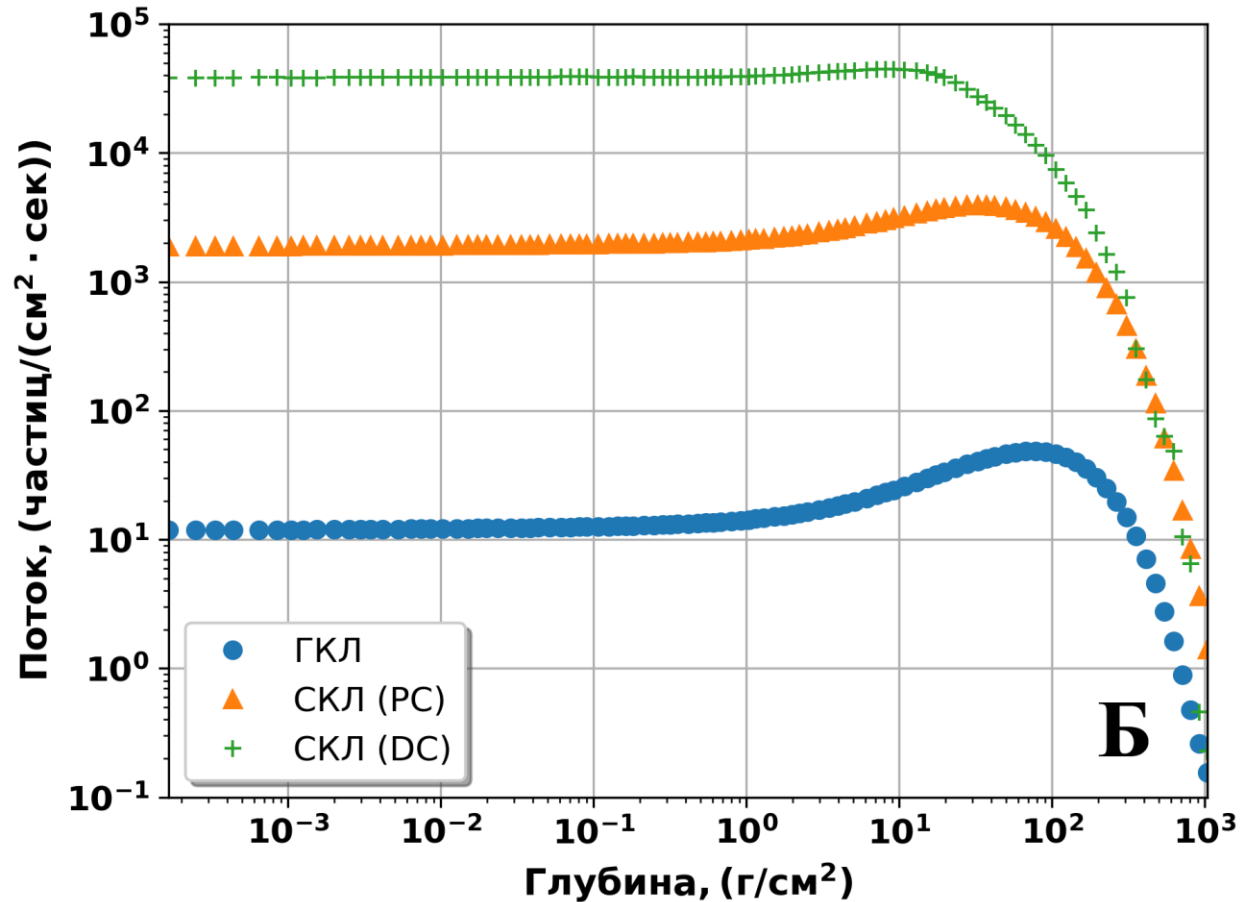
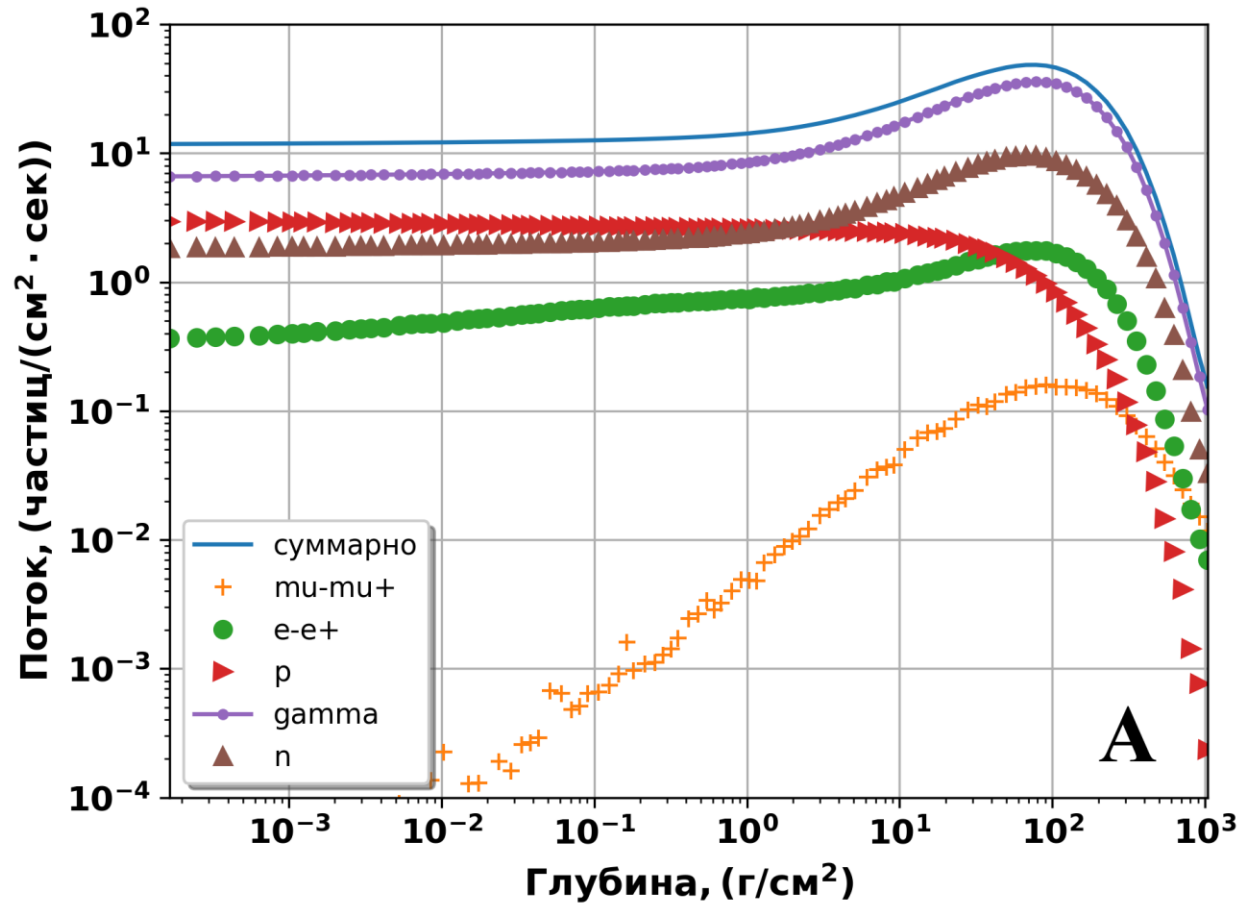
Энергетические спектры вторичных фотонов на высотах от 0 км до 2 км (А) и на высотах от 8 км до 10 км (Б), полученные в результате моделирования прохождения протонов с энергетическими характеристиками, соответствующими спектру ГКЛ, через атмосферу Земли.

РАСЧЕТНЫЕ СПЕКТРЫ НЕЙТРОНОВ В АТМОСФЕРЕ ЗЕМЛИ



Энергетические спектры вторичных нейтронов на высотах от 0 км до 2 км (А) и на высотах от 8 км до 10 км (Б), полученные в результате моделирования прохождения протонов с энергетическими характеристиками, соответствующими спектру ГКЛ, через атмосферу Земли.

РАСЧЕТНЫЕ ПОТОКИ ВТОРИЧНЫХ ЧАСТИЦ КЛ



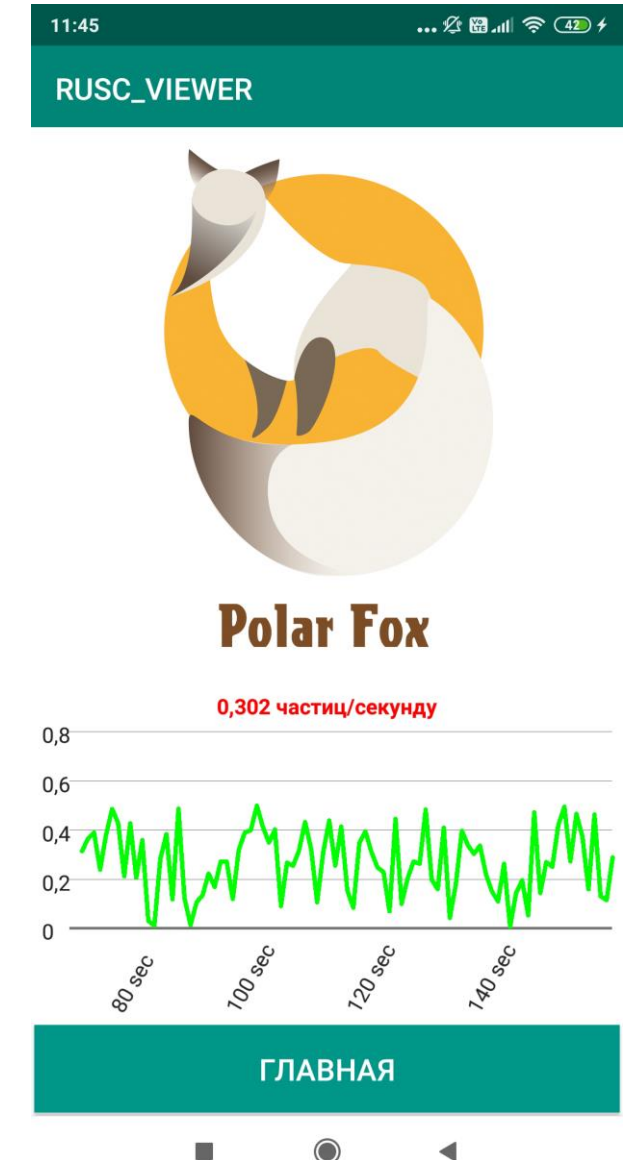
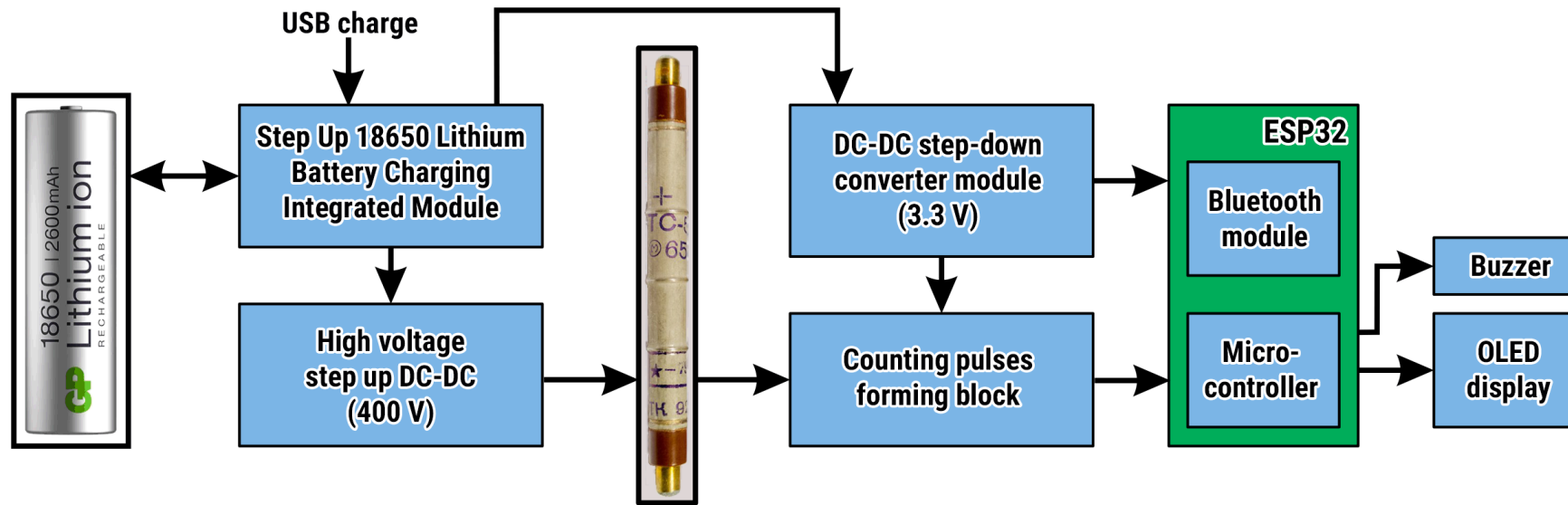
Расчетные интегральные потоки различного типа частиц в зависимости от глубины атмосферы, полученные в результате моделирования прохождения протонов ГКЛ (А) и сравнение с интегральными потоками, полученными при расчете прохождения протонов СКЛ (Б) во время события GLE № 69 для точки с геомагнитным обрезанием $R = 0,65$ ГВ.

РАСЧЕТНЫЕ ЗНАЧЕНИЯ ЭКВИВАЛЕНТНОЙ ДОЗЫ

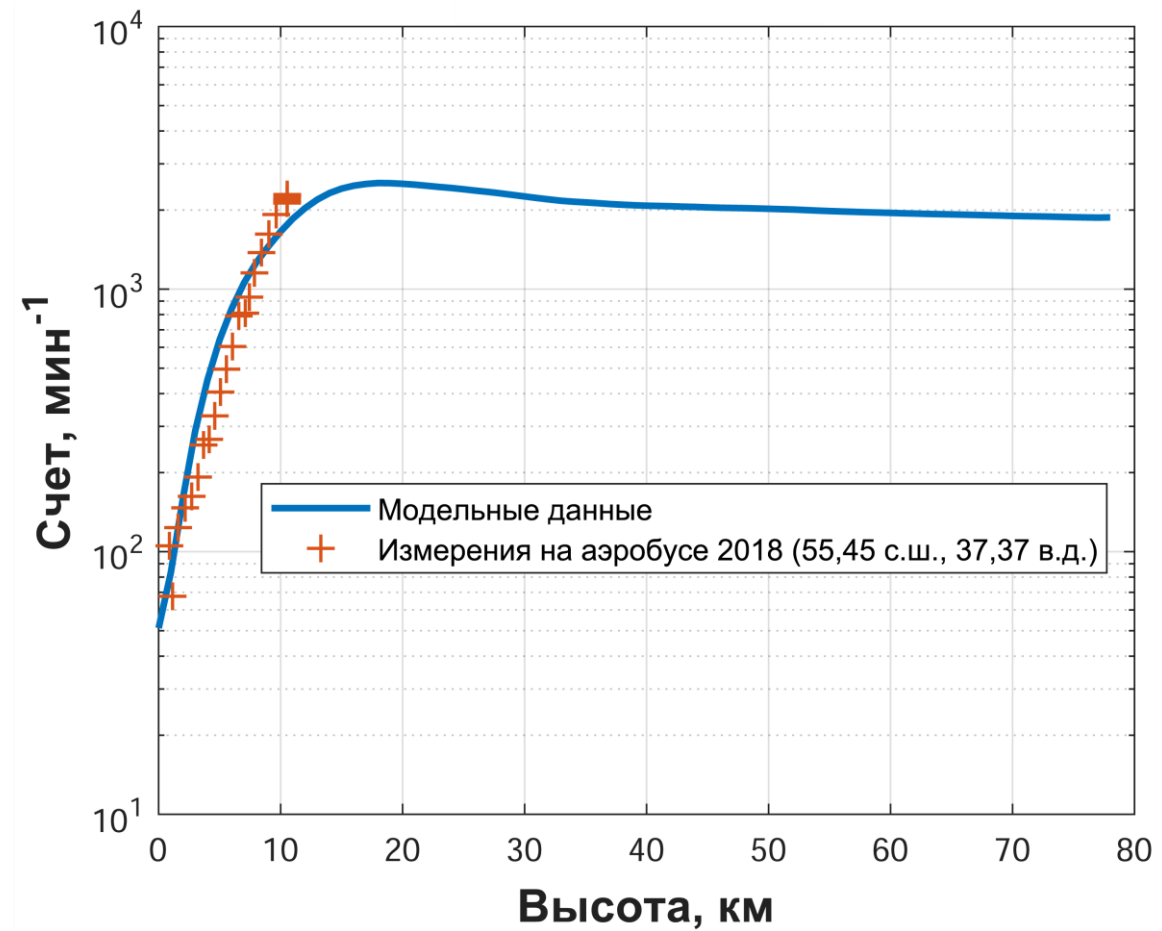
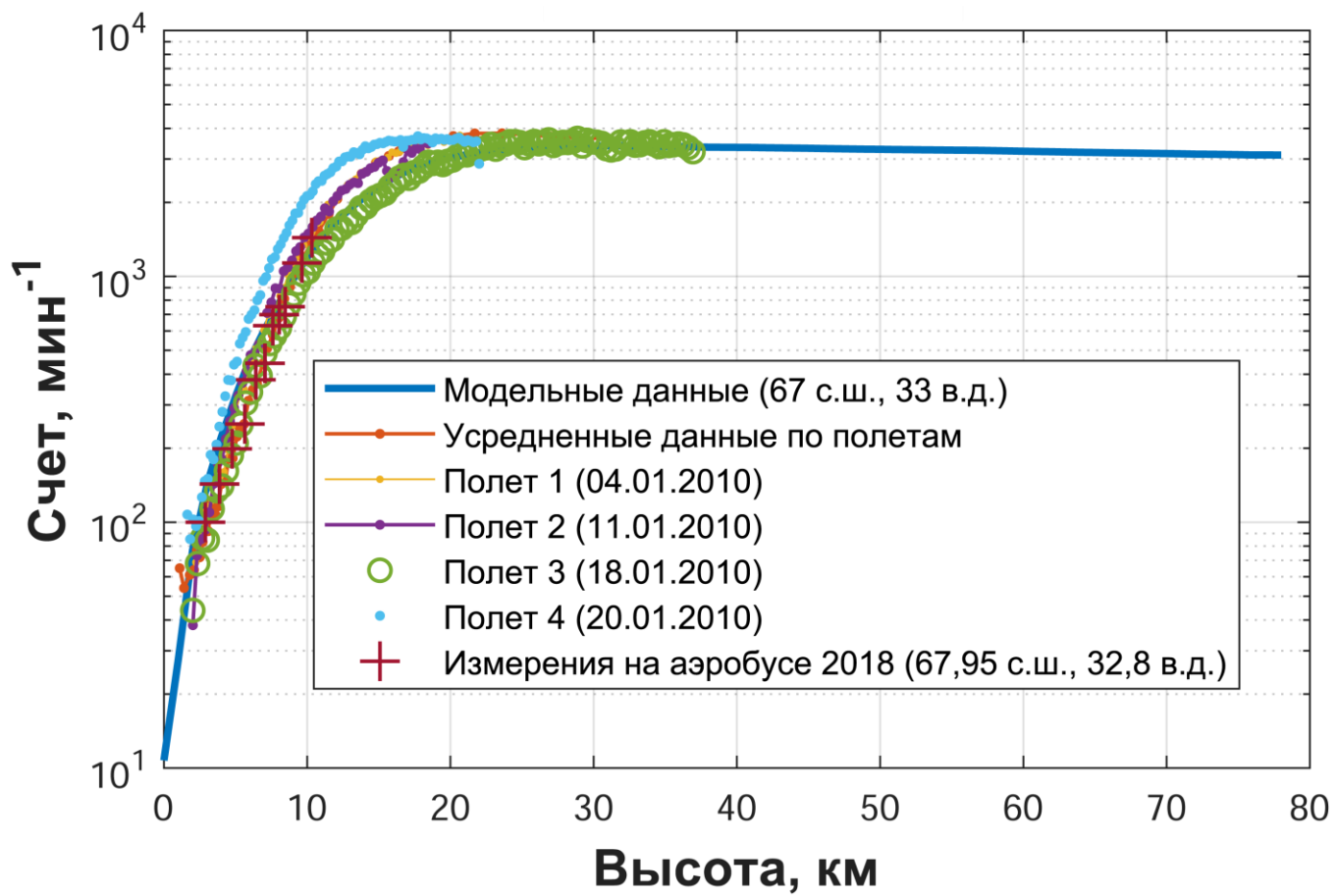
Высота, км	Эквивалентная доза					
	ГКЛ		GLE №69 (PC)		GLE №69 (DC)	
	Час, мкЗв	Год, мЗв	Час, мкЗв	Год, мЗв	Час, мкЗв	Год, мЗв
0	0,130	1,134	0,413	3,614	0,155	1,358
1	0,192	1,681	1,047	9,171	0,256	2,244
2	0,290	2,543	2,897	25,373	1,457	12,759
3	0,469	4,106	6,210	54,395	2,384	20,880
4	0,764	6,693	11,951	104,693	9,911	86,822
5	1,214	10,637	23,327	204,340	27,267	238,863
6	1,935	16,950	42,444	371,813	35,366	309,804
7	2,940	25,755	70,227	615,191	65,236	571,464
8	4,274	37,437	117,558	1029,809	97,279	852,163
9	6,032	52,837	179,210	1569,880	183,526	1607,688
10	8,166	71,532	277,879	2434,222	298,847	2617,901
11	10,552	92,431	412,100	3609,995	513,438	4497,718

ВЕРИФИКАЦИЯ РЕЗУЛЬТАТОВ ИЗМЕРЕНИЙ

КОМПАКТНЫЕ СЧЕТЧИКИ ИОНИЗИРУЮЩЕГО ИЗЛУЧЕНИЯ ДЛЯ ВЕРИФИКАЦИИ RUSCOSMICS



ВЕРИФИКАЦИЯ РЕЗУЛЬТАТОВ МОДЕЛИРОВАНИЯ



ЗАКЛЮЧЕНИЕ

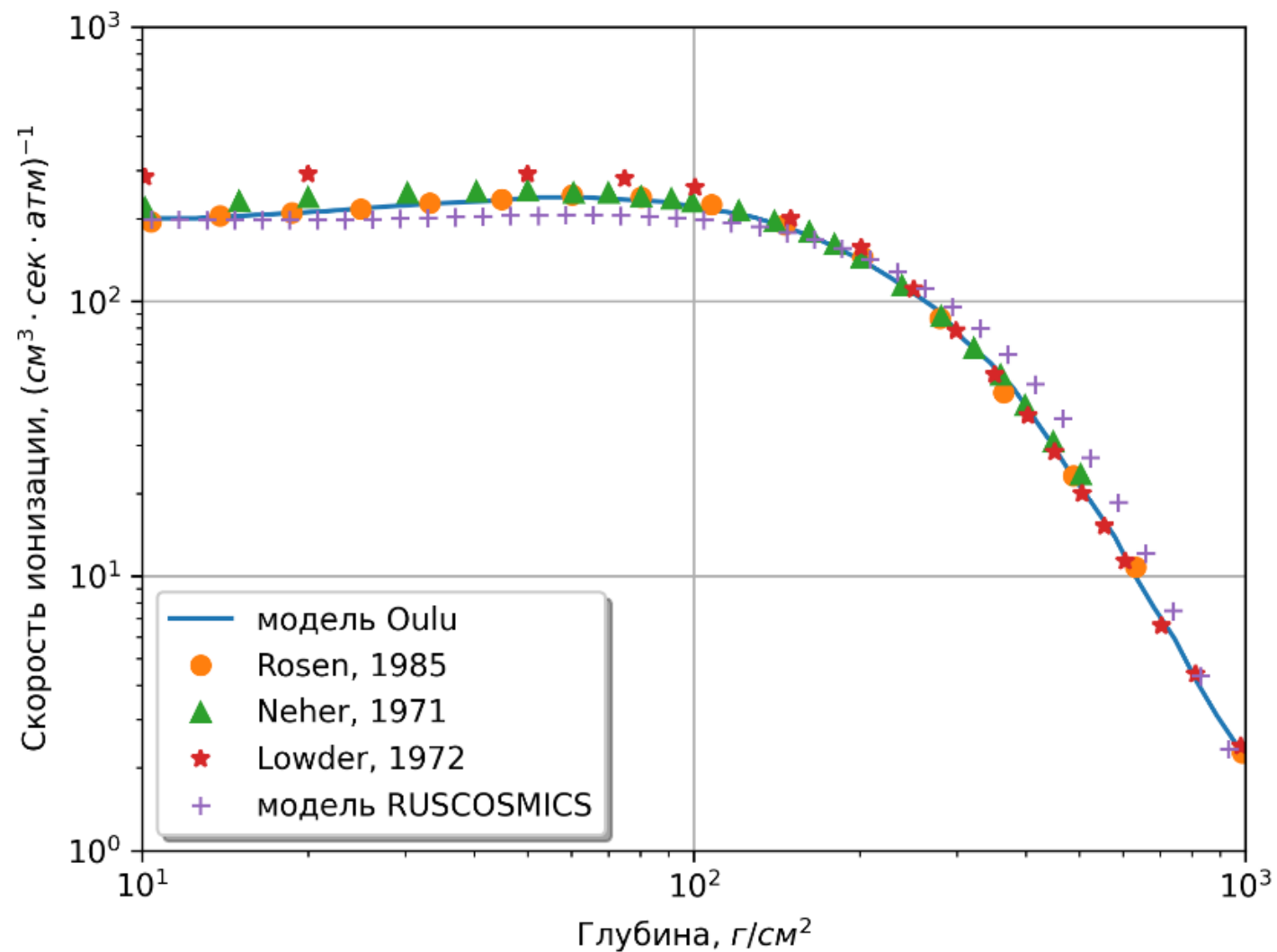
- Разработана модель для моделирования прохождения частиц через атмосферу Земли
 - Проведено моделирование как для СКЛ, так и для ГКЛ
 - Добавлена методика перевода результатов расчетов в значения эквивалентной дозы (Зв)
 - Попытки улучшить методику верификации модели экспериментальными данными
-
- Разрабатывается методика для учета питч-углового распределения при моделировании прохождения СКЛ
 - Для расчета эквивалентной дозы разрабатывается собственная модель антропоморфного фантома

СПАСИБО ЗА ВНИМАНИЕ!!!

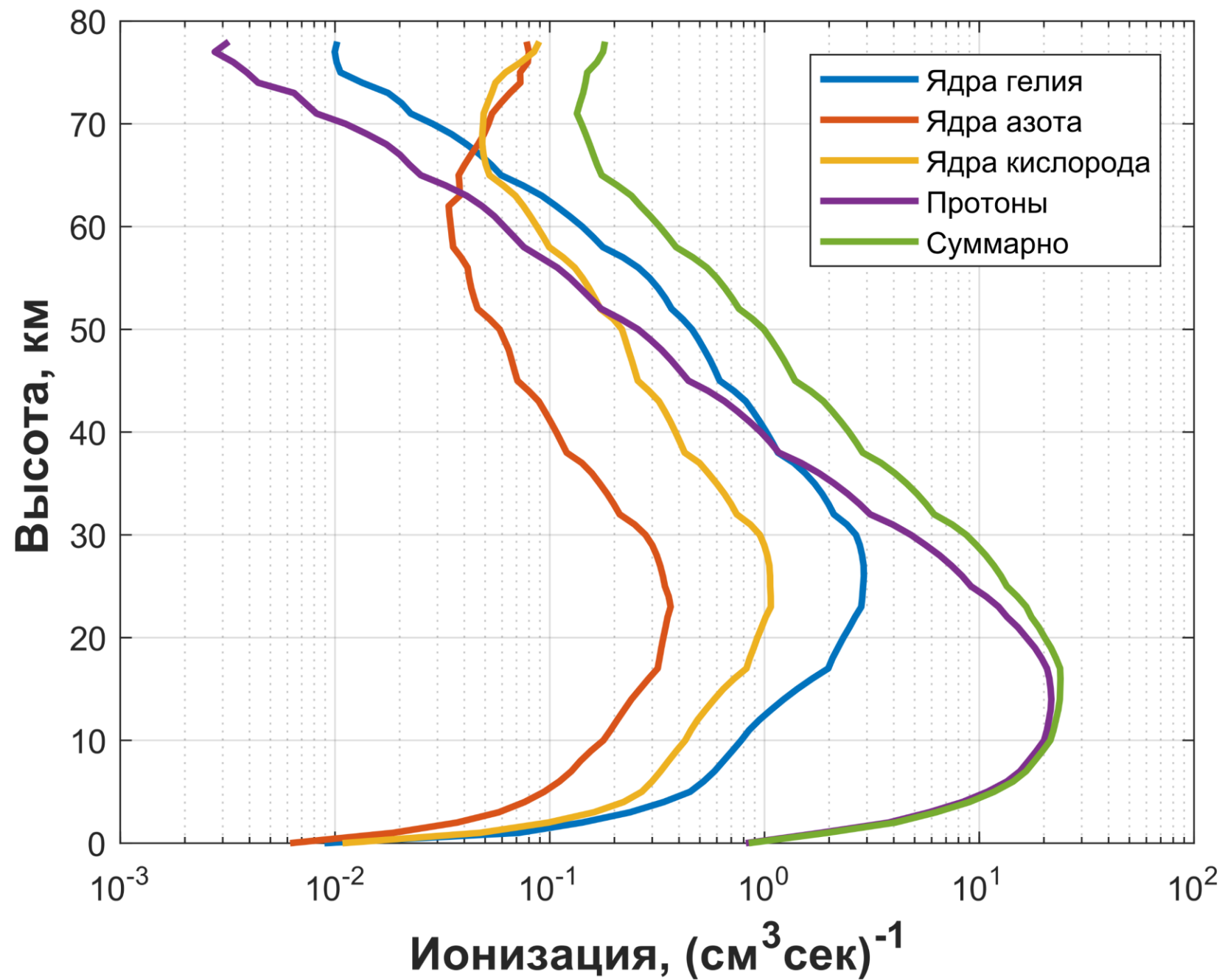
<https://ruscosmics.ru/>

Благодарность

Исследование выполнено при финансовой поддержке гранта РНФ № 18-77-10018

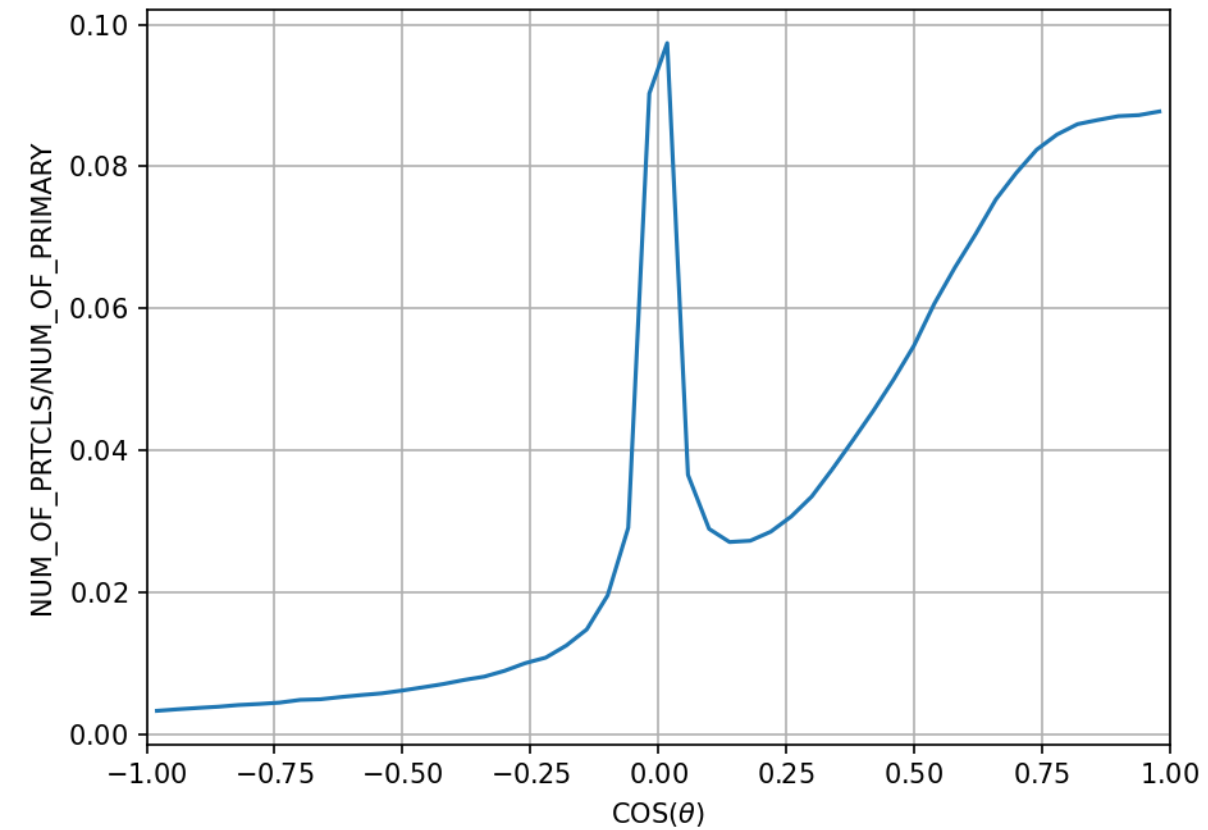


Результат для жёсткости геомагнитного обрезания $R = 1,5$ ГВ показан на рис. **2.13**, параметризация модели используется такая же, как и в разделе 2.1., как и методы валидации. Представленные данные имеют хорошее согласие с теми, что были получены другими группами авторов ([Mironova et al., 2015](#)).



PLANETOSOMICS

COSTHETA distribution of e-



RUSCOSMICS

COSTHETA distribution of e- at 50 km

