



Научные вычисления на процессорах «Эльбрус»

Портирование ROOT и другого научного ПО на
архитектуру e2k

<https://github.com/e2k-community/root-e2k>

Александр Зубанков

a.zubankov@nicct.ru

04.10.2025

ООО "НИЦ ЦТ"

-
1. Введение
 2. Фреймворк CERN ROOT
 3. Портирование ROOT на e2k
 4. Тестирование ROOT на e2k
 5. Другое научное ПО в CollabOS на e2k
 6. Выводы

Введение

Процессоры Эльбрус разрабатываются компанией МЦСТ.

Ключевые особенности:

- Собственная архитектура e2k с закрытым ассемблером
- Оптимизирующий компилятор /cc с закрытым исходным кодом
- Обратная совместимость с предыдущими версиями архитектуры

Эльбрус как манул – до конца не приручаемый

- Создана специально для работы на базе процессоров Эльбрус 8СВ, 2С3, 16С
- Поддержка пакетной базы на основе CentOS 9 и EPEL
- Легкость в переходе на процесоры Эльбрус с других дистрибутивов Linux, основанных на RedHat (CentOS, Fedora, Scientific Linux, AlmaLinux)
- Поддержка языков C, C++, Fortran, Python 3.9, Perl, Java 8 и 11, PHP, Lua, Ruby, R, Rust
- Свидетельство о регистрации программы для ЭВМ №2025682696



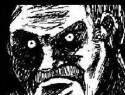
Современная физика невозможна без компьютерных вычислений - от обработки результатов экспериментов до симуляции процессов.

Ввиду нераспространенности и закрытости отечественных процессоров Эльбрус, невозможна нативная поддержка ПО, собранного под популярные архитектуры.

а помните как
в СССР
у учёных не
было доступа к
суперкомпьютерам?



У МЕНЯ
ДО СИХ ПОР
ЕГО НЕТ



В докладе будет представлено портированное на процессоры Эльбрус ПО, позволяющее проводить анализ данных.

Фреймворк CERN ROOT

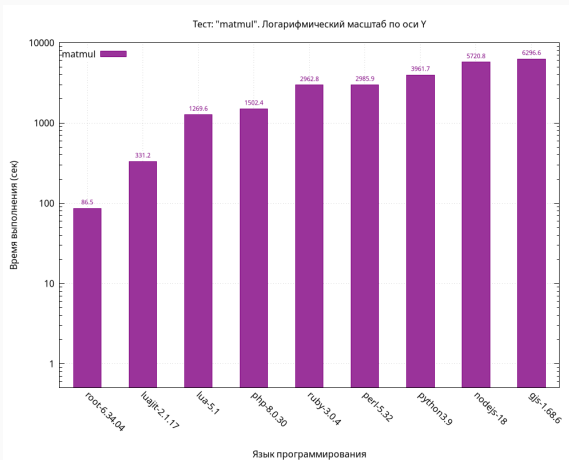
Одним из наиболее широко используемых инструментов для вычислений в физике высоких энергий и ядерной физике является фреймворк *ROOT*, разрабатываемый в CERN.

ROOT написан для обработки, хранения, визуализации и анализа научных данных в рамках единого программного пакета физиками, что делает его довольно доступным.

Особенностью является интерпретатор C++ *Cling*, позволяющий в интерактивном режиме работать с данными.



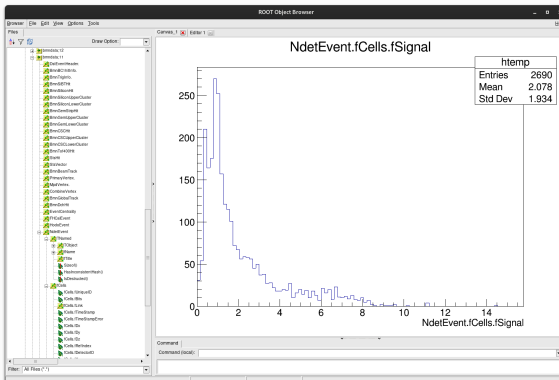
Cling – самый быстрый интерпретатор на всем диком Эльбрусе¹!



¹ Кто быстрее? Тестируем скорость языков программирования на Эльбрусе
URL: https://habr.com/ru/companies/nic_ct/articles/917490/

ROOT удобен для быстрого анализа с возможностью работы с графическим интерфейсом в TBrowser для чтения .root файлов.

Файлы .root - удобный способ сохранения данных или любого объекта C++ в сжатом бинарном виде. Сегодня в файлах .root хранится более $2 \times 10^6 TB$ данных.



В настоящее время ROOT стал практически стандартом программного обеспечения для современных ускорительных экспериментов (AliRoot, FairRoot, BmnRoot, MpdRoot и др.).



Портирование ROOT на e2k

Сборка ROOT в конфигурации максимально приближенной к epel 9 требует:

- R – язык для анализа и визуализации данных,
- xrootd – расширенный файловый сервер ROOT,
- pythia8 – генератор взаимодействий в физике высоких энергий,
- библиотеки для работы с математикой – openblas, flexiblas, atlas, libarrow, lhpdf, cfitsio
- СУБД – MySQL, PostgreSQL и SQLite
- и другие пакеты дистрибутива

Compiler:	lcc	llvm-13	llvm-17	llvm-19	llvm-18 Unipro
ROOT v6.30	✓	✓	✓	?	✓
ROOT v6.34	–	✓	✓	–	✓
ROOT v6.36	–	–	–	–	✓

Версии ROOT от v6.34 основаны на библиотеках llvm-18, когда как в v6.30 основой является llvm-13.

Поэтому сборка с lcc ограничена v6.30, так как свежие версии llvm им не собираются. Из доступных llvm имеются версия с lcc-бэкендом от МЦСТ² и версия от Унипро.

²URL: <https://gitflic.ru/project/e2khome/llvm-project-e-2-k>

Для сборки используем llvm-18 от Unipro, так как llvm от МЦСТ не справляется с линковкой *libCling.so* падая с ошибкой:

```
relocation truncated to fit: R_E2K_DISP against symbol
```

Эту ошибку с llvm от МЦСТ удавалось обходить в v6.34 отключением сборки библиотеки автоматического дифференцирования Clad вместе с отключением генерации отладочной информации -g0, изменением типа сборки на MinSizeRel и cmake опцией -DBUILD_SHARED_LIBS=ON.

В ROOT используется свой форк llvm-18 с дополнительным функционалом.

Исходники llvm-18 с нативной кодогенерацией без lcc от Унипро закрыты, что не дает возможности модифицировать его для работы с ROOT.

Поэтому добавление поддержки e2k осуществлялось по схеме:



А также необходимо установить последние версии компонент lccrt и liblccopt 148308.

Для сборки добавлена поддержка e2k в файлы:

- cmake/modules/SetUpLinux.cmake
- config/root-config.in
- etc/Makefile.arch
- root/core/foundation/inc/ROOT/RConfig.hxx
- interpreter/CMakeLists.txt

Дополнительно добавляются флаги cmake для работы llvm-e2k с lccrt и liblccopt 148308:

- DLLVM_TARGET_ARCH=e2k
- DLLVM_DEFAULT_TARGET_TRIPLE=e2k64-unknown-linux-gnu
- DLLVM_WITH_LCCRT=/usr/lib64/lccrt
- DLLVM_LCCRT_RELEASE=True

Ошибка вида:

```
Error in <AnnotatedRecordDecl::BuildDemangledTypeInfo>:  
Demangled typeid name 'TypeInfo for TStreamerElement'  
does not start with 'typeid for'
```

Решается изменением в `core/clingutils/src/TClingUtils.cxx` в случае `e2k`:

```
- static const char typeNameFor[] = "typeid for";  
+ static const char typeNameFor[] = "TypeInfo for";
```

При сборке с использованием llvm от МЦСТ из ветки master (или свежих версий) ROOT может собраться, но оказаться нерабочим при запуске. Причина кроется в добавлении строки в interpreter/CMakeLists.txt

```
set(LLVM_UNREACHABLE_OPTIMIZE FALSE)
```

Аналогичная проблема была и при сборке clang-17 с флажками -O3, -O2, -O1. Поэтому следует не задавать LLVM_UNREACHABLE_OPTIMIZE для e2k.

Также при сборке ROOT v6.30 и ниже с использованием lss могут возникать и другие ошибки (undefined reference, не находятся заголовочные файлы и др.).

```
Welcome to ROOT 6.36.04                                     https://root.cern
(c) 1995-2025, The ROOT Team; conception: R. Brun, F. Rademakers
Built for linuxx2k on Aug 25 2025, 00:00:00
From tags/6-36-04@6-36-04
With Unipro (https://unipro.ru/) clang version 18.1.4 (0572ad00c57bfd191ddae9b1e93ba1232116d739)
Try '.help'/''.?', '.demo', '.license', '.credits', '.quit'/''.q'
```

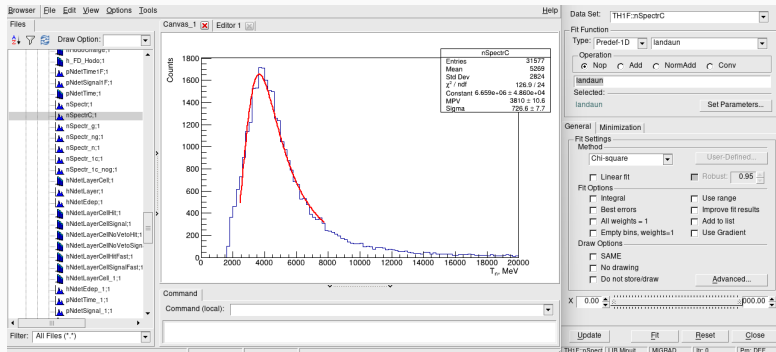


It still runs ROOT!!



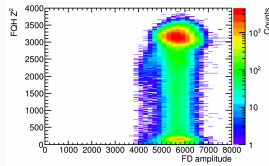
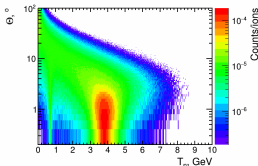
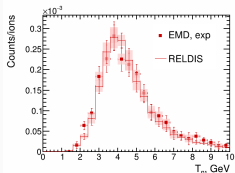
Тестирование ROOT на e2k

Пример фитирования спектра с детектора HGND в эксперименте BM@N на NICA в TBrowser на e2k.



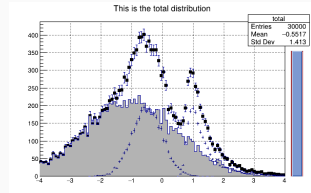
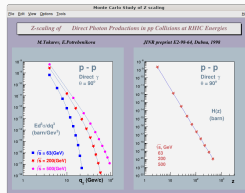
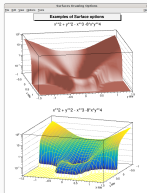
Построим гистограммы из моей недавно опубликованной статьи³ (Q1, IF 3.8). Просмотр статьи доступен по ссылке: <https://rdcu.be/eNr1A>

Данные получены как из экспериментальных данных, так и из моделирования в Geant4.



³Zubankov, A., Afanasiev, S., Golubeva, M. et al. Performance study of the Highly Granular Neutron Detector prototype in the BM@N experiment. *NUCL SCI TECH* **36**, 226 (2025). DOI: 10.1007/s41365-025-01817-x

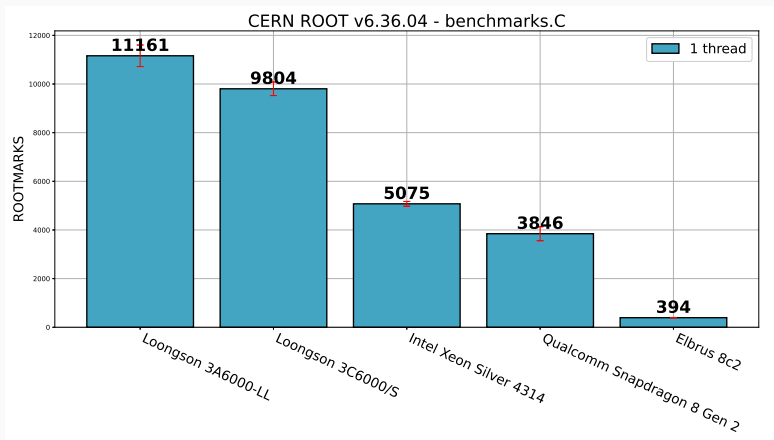
Тестирование в встроенном бенчмарке tutorials/legacy/benchmarks.C по обработке данных, заполнению, фитированию и построению гистограмм и графиков.



Результат тестирования ROOT v6.36.04 benchmarks.C на Эльбрус 8CB:

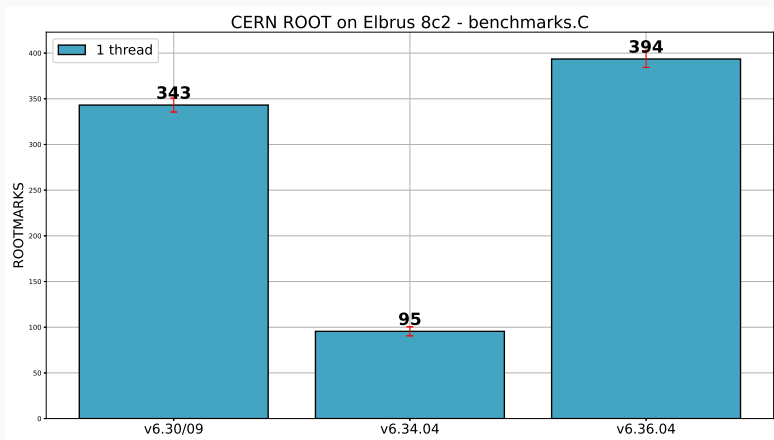
```
-----ROOT 6.36.04 benchmarks summary (in ROOTMARKS)-----  
    For comparison, a Pentium IV 2.4Ghz is benchmarked at 600 ROOTMARKS  
hsimple    =  45.35 RealMARKS,   =  48.70 CpuMARKS  
tornado    = 16721.48 RealMARKS, = 2400.00 CpuMARKS  
na49       = 13609.23 RealMARKS, = 11914.29 CpuMARKS  
geometry   =  748.73 RealMARKS,   =  675.00 CpuMARKS  
na49view   =  335.50 RealMARKS,   =  360.00 CpuMARKS  
ntuple1    =  133.96 RealMARKS,   =  138.46 CpuMARKS  
  
*****  
* Your machine is estimated at  389.15 ROOTMARKS  *  
*****
```

Результат тестирования ROOT v6.36.04 benchmarks.C на разных ЦПУ по 10 итераций. Большее значение – лучшее.



Тестирование версий ROOT на e2k в benchmarks.C.

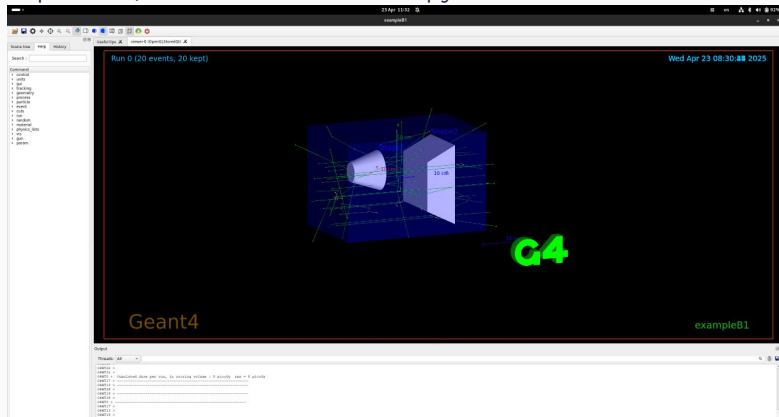
Собирались: v6.30 – с lcc; v6.34 – с llvm-13 от МЦСТ; v6.36 – с llvm-18 от Унипро.



Другое научное ПО в CollabOS на e2k

Geant4 – инструмент моделирования прохождения частиц через вещество в ядерной, ускорительной и физике высоких энергий, а также в областях медицины и космонавтики.

Визуализация прохождения 20 гамма-квантов с энергией 6 МэВ через вещество в Geant4 на Эльбрус 8СВ.



PYTHIA - это программа для генерации событий физики высоких энергий и их описания.

Она содержит теории и модели, включая жесткие и мягкие взаимодействия, распределения партонов, ливни партонов в начальном и конечном состояниях, множественные взаимодействия, фрагментацию и распад.

```
----- PYTHIA Process Initialization -----
We collide p+ with p+ at a CM energy of 8.000e+03 GeV

Subprocess      Code | Estimated
                  | | max (mb)
-----
g g -> g g      111 | 1.404e+00
g g -> q qbar (uds) 112 | 1.817e-02
q g -> q g      113 | 1.011e+00
q qbar -> q qbar' 114 | 1.160e-01
q qbar -> g g    115 | 8.378e-04
q qbar -> q' qbar' (uds) 116 | 3.698e-04
g g -> c cbar   121 | 5.989e-03
q qbar -> c cbar 122 | 1.222e-04
g g -> b bbar   123 | 5.998e-03
q qbar -> b bbar 124 | 1.168e-04

----- End PYTHIA Process Initialization -----

----- PYTHIA Multiparton Interactions Initialization -----

sigmaNonDiffraction = 51.78 mb

pT0 = 2.35 gives sigmaInteraction = 258.98 mb: accepted

----- End PYTHIA Multiparton Interactions Initialization -----
```

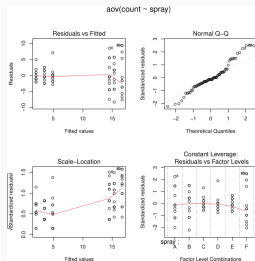
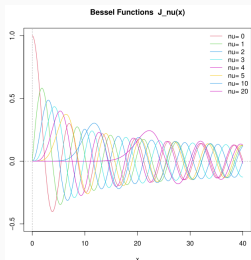
```
2025-03-20 15:00 charged multiplicity

7.00e+00 0 X X
6.75e+00 0 X X
6.50e+00 0 X X
6.25e+00 0 X X
6.00e+00 0 X X X X
5.75e+00 0 X X X X
5.50e+00 0 X X X X
5.25e+00 0 X X X X
5.00e+00 0 XX XX XXX X
4.75e+00 0 XX XX XXX X
4.50e+00 0 XX XX XXX X
4.25e+00 0 XX XX XXX X
4.00e+00 0 XX XXXXXXX
3.75e+00 0 XX XXXXXXX
3.50e+00 0 XX XXXXXXX
3.25e+00 0 XX XXXXXXX
3.00e+00 0 X XXXXXXXXXX X
2.75e+00 0 X XXXXXXXXXX X
2.50e+00 0 X XXXXXXXXXX X
2.25e+00 0 X XXXXXXXXXX X
2.00e+00 0 X XXXXXXXXXX X XXXXXX
1.75e+00 0 X XXXXXXXXXX X XXXXXX
1.50e+00 0 X XXXXXXXXXX X XXXXXX
1.25e+00 0 X XXXXXXXXXX X XXXXXX
1.00e+00 0 XX XXXXXXXXXX XXXXXXXX X
0.75e+00 0 XX XXXXXXXXXX XXXXXXXX X
0.50e+00 0 XX XXXXXXXXXX XXXXXXXX X
0.25e+00 0 XX XXXXXXXXXX XXXXXXXX X
```

Пример main101 по столкновению протонов с энергией 8 ГэВ.

Язык R предоставляет широкий спектр статистических и графических методов (линейное и нелинейное моделирование, статистические тесты, анализ временных рядов, классификация, кластеризация, ...).

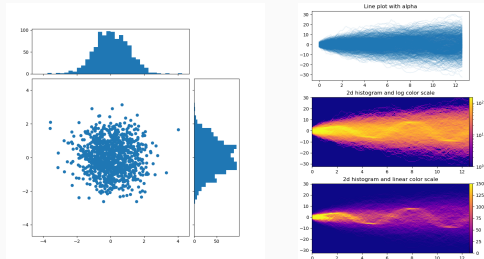
Для решения задач с интенсивными вычислениями можно подключать и вызывать код на языках C, C++ и Fortran во время выполнения.



NumPy позволяет проводить быстрые числовые и матричные вычисления.

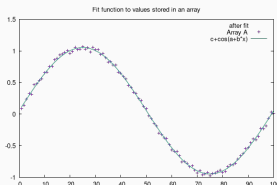
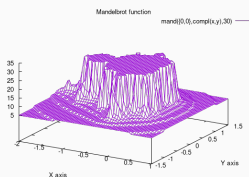
Matplotlib – основной инструмент построения графиков и гистограмм.

SciPy – это набор функций для выполнения базового научного программирования и анализа данных.



Gnuplot - мультиплатформенная портативная графическая утилита с командной строкой, позволяющая визуализировать математические функции и данные как в интерактивном режиме, так и в неинтерактивных применениях, таких как веб-скриптинг.

Octave - высокоуровневый язык для численных вычислений с обширными математическими инструментами. Совместим со скриптами Matlab и расширяется пользовательскими функциями, написанными на Octave, C, C++, Fortran и др. языках.



Выводы

- ROOT - мощный инструмент "все в одном" для анализа данных - теперь можно использовать и на Эльбрусах⁴.
- К сожалению, в официальный репозиторий пока поддержку e2k добавить не удастся, как и гарантировать, что он будет работать для еще невышедших версий.
- Несмотря на не очень высокий результат в бенчмарке, ROOT на e2k спокойно можно использовать для повседневной работы, как на любом персональном компьютере. Для тяжелых вычислений Эльбрусы не подойдут. Возможно, если исходники порта llvm-18 от Унипро появятся в открытом доступе, то ROOT станет работать быстрее.

⁴ROOT fork with e2k arch support

URL: <https://github.com/e2k-community/root-e2k>

Портирование фреймворка ROOT на архитектуру e2k

URL: https://habr.com/ru/companies/nic_ct/articles/921676

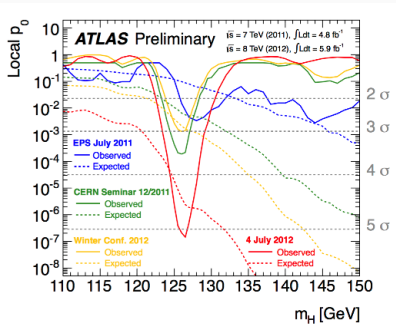
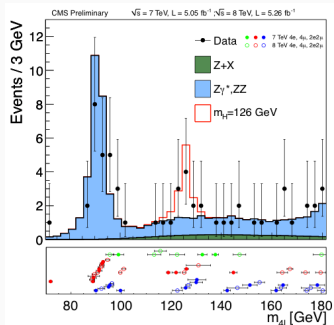
Портированы на архитектуру Эльбрус для научных целей:

- Обработка данных, статистика, симуляция – ROOT (6.30/6.34/6.36), R, SciPy, NumPy, Pythia8, LHAPDF, Octave, Geant4
- Построение графиков, гистограмм, диаграмм – ROOT, R, Matplotlib, Gnuplot, Octave
- Верстка текста – TeXLive, AbiWord, LibreOffice
- Языки – C, C++, Fortran, Python 3.9, Perl, Java 8 и 11, PHP, Lua, Ruby, R, Rust, Octave
- Библиотеки для линейной алгебры – ATLAS, OpenBLAS, FlexiBLAS

Презентация и материалы подготовлены в CollabOS на процессорах Эльбрус 8СВ и 2С3.

-
- Михаилу Лукашову за неоценимую помощь в сборке llvm и портировании ROOT
 - Павлу Степанову за помощь в сборке llvm-17
 - Евгению Плисковскому за консультацию при портировании root-6.30 (именно ему удалось первым собрать root-6.28 на e2k)
 - Валентину Василенко за тестирование Cling среди других интерпретаторов на e2k

СПАСИБО ЗА ВНИМАНИЕ!



Бозон Хиггса был открыт с помощью open-source ROOT –
давайте развивать открытое ПО для прогресса науки!

CPU	Thr	GHz	L1 I/D, KB	L2, KB	L3, MB	RAM, GB
Loongson 3A6000-LL	8	2.3	64/64	256	16	16 (2ch)
Elbrus 8C2 (×4)	8(×4)	1.5	128/64	512	16	128 (16ch)
Intel Xeon Silver 4314	32	2.4	32/48	1280	24	32 (2ch)

Table 1: Основные характеристики тестируемых CPU.