ВНИИМ
ФГУП «Всероссийский научно-исследовательский институт метрологии им. Д.И.Менделеева»

Особенности обработки данных межлабораторной характеризации стандартных образцов



РГ СО НТКМетр
15 октября 2026 г., Екатеринбург

Докладчик: Павел Мигаль,
к.т.н., зам. директора филиала по науке

Терминология

- РМГ 29-2013 :
  - 8.19 **стандартный образец СО**: Материал, достаточно однородный и стабильный в отношении определенных свойств для того, чтобы использовать его при измерении или при оценивании качественных свойств в соответствии с предполагаемым назначением.
  - 8.20 **…сертифицированный стандартный образец ССО**: **СО** с сопроводительной документацией, выданной авторитетным органом, в которой указано одно или более значений определенного свойства с соответствующими показателями точности (**неопределенностями**) измерений и **прослеживаемостью**, которые установлены с использованием обоснованных процедур.
  - 9.2 **метрологическая прослеживаемость**: Свойство результата измерения, в соответствии с которым результат может быть соотнесен с основой для сравнения через документированную непрерывную цепь **калибровок**, каждая из которых вносит вклад в **неопределенность** измерений.
    - В этом определении "основой для сравнения" может быть **определение единицы** измерения через ее практическую реализацию или **методика измерений**, или **эталон**.
    - Метрологическая прослеживаемость требует наличия установленной калибровочной иерархии и/или поверочной схемы.
    - Для подтверждения метрологической прослеживаемости ILAC рассматривает следующие элементы: непрерывная **цепь** метрологической **прослеживаемости** к международным **эталонам** или национальным эталонам, документированная **неопределенность** измерений, документированная **методика** измерений, **аккредитация** на техническую компетентность, метрологическая прослеживаемость к СИ и интервалы между калибровками.
  - 9.13 **цепь метрологической прослеживаемости**: Последовательность эталонов и калибровок (поверок), которые используются для соотнесения результата измерения с основой для сравнения.

Прослеживаемость ССО

- **ISO/TR 16476:2016** Reference materials — Establishing and expressing metrological traceability of quantity values assigned to reference materials
  - Приняты четыре основных подхода к характеризации стандартных образцов:
    - a) измерение отдельным (первичным) методом в отдельной лаборатории;
    - b) измерение двумя или более независимыми стандартными методами в одной лаборатории;
    - **c) измерение сетью лабораторий, использующих один или несколько методов с демонстрируемой точностью;**
    - **d) подход с конкретным методом, дающий только оценку значений свойств данным методом, с участием сети лабораторий.**
  - Пути прослеживаемости:
    - 1) (прямая) прослеживаемость к единице измерительной шкалы,
    - 2) прослеживаемость к единице измерительной шкалы через и при наличии метода или процедуры измерения,
    - 3) прослеживаемость к протоколу.

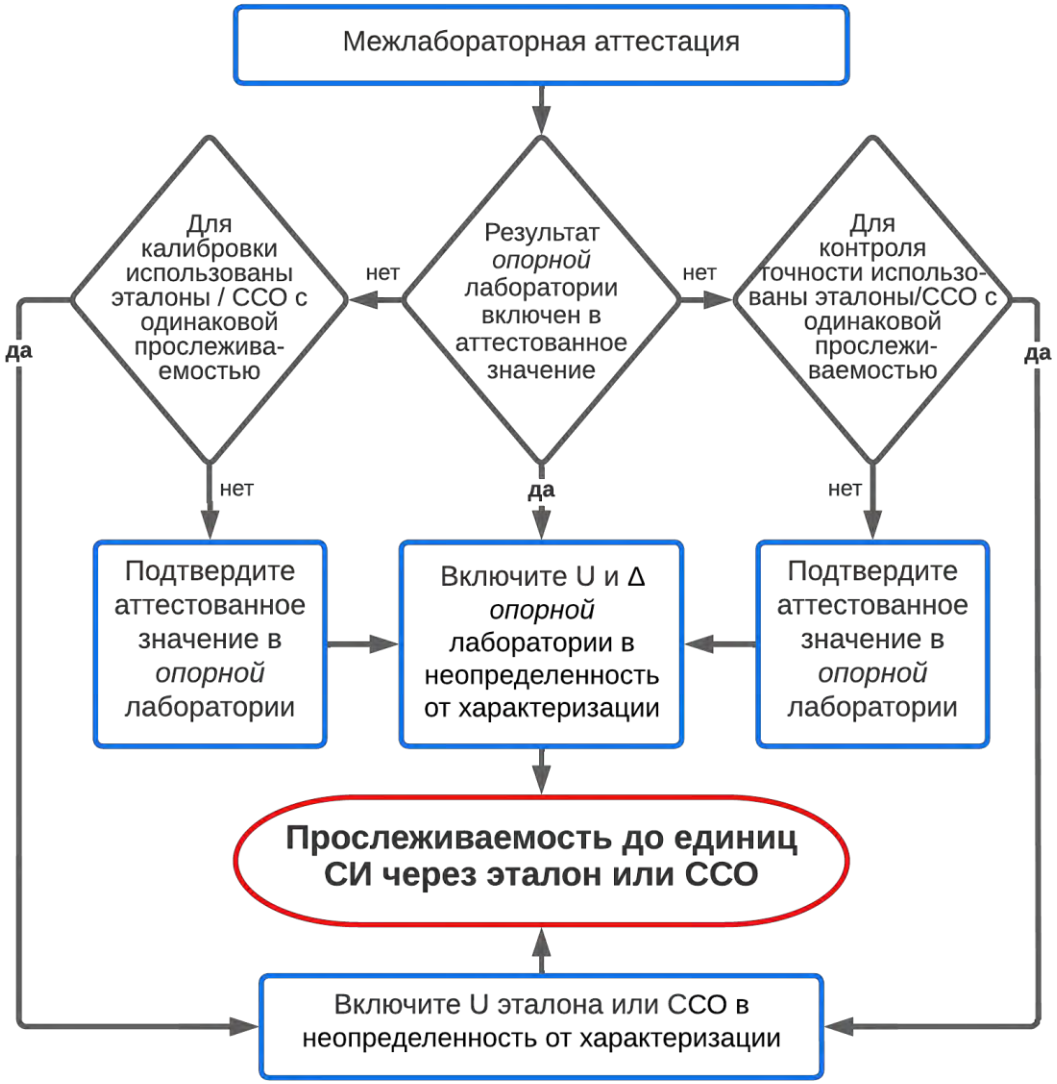
Подход	Путь		
	1	2	3
a	+	-	+
b	+	+	-
c	-	+	-
d	-	+	+

Связь с основой для сравнения



*Опорная лаборатория должна быть способна продемонстрировать прослеживаемость и полный бюджет неопределенности. Опорной может быть лаборатория, которая применяет первичный или вторичный эталон либо первичную референтную или референтную методику измерений.

Измерение сетью лабораторий, использующих один или несколько методов с демонстрируемой точностью



Межлабораторная аттестация

a. Если участники МЛЭ применяют одни методы измерений и при реализации процедур измерений (калибровка или контроль точности) используют те же или аналогичные эталоны или ССО с прослеживаемостью к тем же единицам СИ, прослеживаемость устанавливается через применяемые эталоны или ССО при условии что неопределенность применяемого эталона или ССО включается в неопределенность характеризации.

b. В случаях когда **не** соблюдается начальное условие по а. необходимо привлекать ***опорную*** лабораторию для установления прослеживаемости. ***Опорная*** лаборатория должна быть способна продемонстрировать прослеживаемость и полный бюджет неопределенности. ***Опорной*** может быть лаборатория, которая применяет эталон или ССО по п. 1 либо первичную референтную или референтную методику измерений по п. 2 либо реализует аттестованную методику по п. 4. Обычно это лаборатория метрологического института или производителя СО. Прослеживаемость в этой ситуации устанавливается к единицам СИ через опорную лабораторию путем включения в неопределенность характеризации СО неопределенности *опорной* лаборатории.

Проблематика

- Априори предполагается, что результаты представляют собой выборку из нормальной генеральной совокупности, возможно засорённую выбросами
- Сведения о точности результатов, представляемых лабораториями, не всегда корректно используются или не используются совсем, что приводит к тому, что стандартная неопределённость аттестованного значения оказывается значительно меньше неопределённости отдельного результата любого участника;
- В МЛЭ допускаются различные методы определения аттестованного значения, при реализации которых лаборатории используют различные основы для сравнения (чаще всего – СО), в итоге не представляется возможным установить до какой основы сравнения обеспечена прослеживаемость аттестованного значения СО
- В связи с многообразием подходов к определению аттестованного (сертифицированного) значения СО и его неопределённости возникает проблема обоснованного выбора алгоритма обработки данных МЛЭ

Теоретическая часть

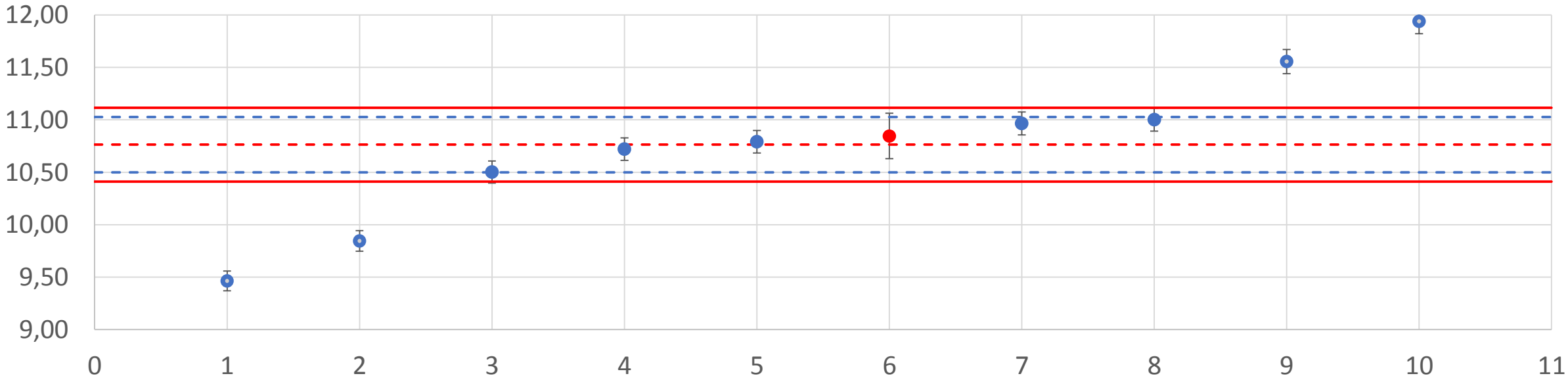
Данные МЛЭ представляют собой набор пар

$$\{x_i;u_i\},\ i=1,N$$

где x_i – результат измерений i-й лаборатории;

u_i – его стандартная неопределённость;

N – число лабораторий – участников МЛЭ.



Рассматриваемые методы обработки МЛЭ

1. Среднее арифметическое
2. Выборочная медиана
3. Взвешенное среднее
4. Оценка Р.С.Пауля и Д.Манделя (R.C.Paule and J.Mandel)
5. Оценка Р.ДерСимониан и Н.Лэирд (R.DerSimonian and N.Laird)
6. Робастная оценка П.Д.Хубера (P.J.Huber)
7. Робастная оценка с итеративной шкалой по ГОСТ 50779.60 (алгоритм А)
8. Робастная оценка по ГОСТ 8.532-2002 (Бивес-оценка, предложенная Джоном Уайлдером Тьюки)
9. Оценка Мориса Кокса (M.Cox)
10. -12. Оценки П.М.Аронова

Экспериментальная часть

Для сравнения работы алгоритмов был применен метод Монте-Карло. Данные моделировались следующим образом:

$$x_i = x + \Delta_i + \xi_i,\ i = \overline{1,n}, \quad x_i = x + \xi_i,\ i = \overline{n+1,N};\ \ 1 \le n \le N/2,$$

где x – истинное значение измеряемой величины;

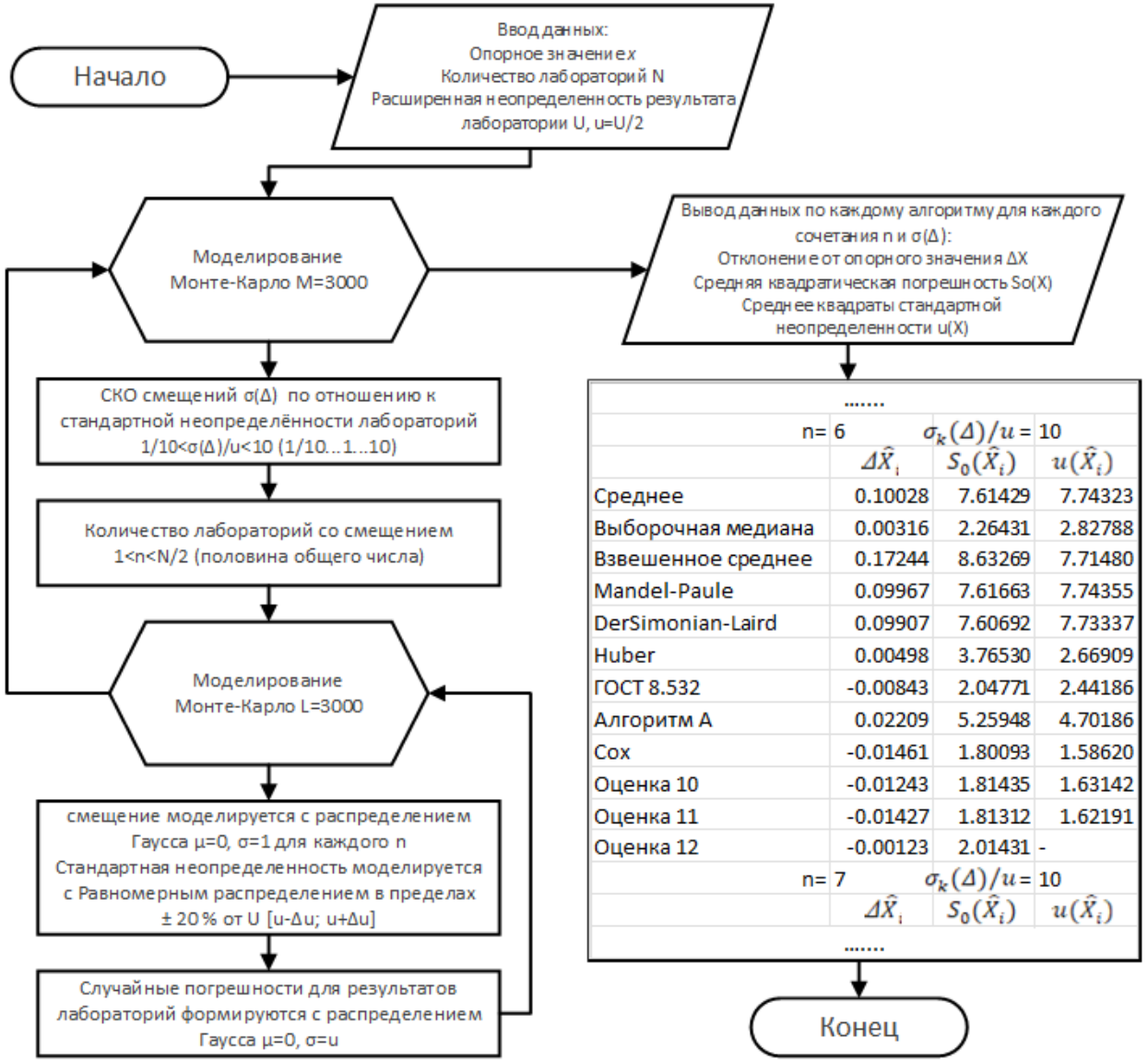
Δ_i – скрытый сдвиг (систематическая погрешность) результата i-й лаборатории;

ξ_i – случайная погрешность результата i-й лаборатории;

N – число лабораторий – участников МЛЭ;

n – число лабораторий, имеющих скрытые сдвиги результатов.

Экспериментальная часть



.....

n= 6		$\sigma_k(\Delta)/u$ = 10	
	$\Delta\hat{X}_i$	$S_0(\hat{X}_i)$	$u(\hat{X}_i)$
Среднее	0.10028	7.61429	7.74323
Выборочная медиана	0.00316	2.26431	2.82788
Взвешенное среднее	0.17244	8.63269	7.71480
Mandel-Paule	0.09967	7.61663	7.74355
DerSimonian-Laird	0.09907	7.60692	7.73337
Huber	0.00498	3.76530	2.66909
ГОСТ 8.532	-0.00843	2.04771	2.44186
Алгоритм А	0.02209	5.25948	4.70186
Cox	-0.01461	1.80093	1.58620
Оценка 10	-0.01243	1.81435	1.63142
Оценка 11	-0.01427	1.81312	1.62191
Оценка 12	-0.00123	2.01431	-
n= 7		$\sigma_k(\Delta)/u$ = 10	
	$\Delta\hat{X}_i$	$S_0(\hat{X}_i)$	$u(\hat{X}_i)$

.....

Входные данные:

- истинное значение измеряемой величины **x=100**
- средняя стандартная неопределенность результатов **u=5**
- разброс стандартных неопределённостей лабораторий **Δu=2**
- число лабораторий **N=16**
- смещения взяты из распределения Гаусса **L=M=3000**

Выходные данные:

- Погрешность (смещение)

$$\Delta\hat{X}_i = \frac{1}{LM}\sum_{l=1}^{L}\sum_{j=1}^{M}\left(\hat{X}_{ilj} - x\right),$$

- Среднеквадратическая погрешность

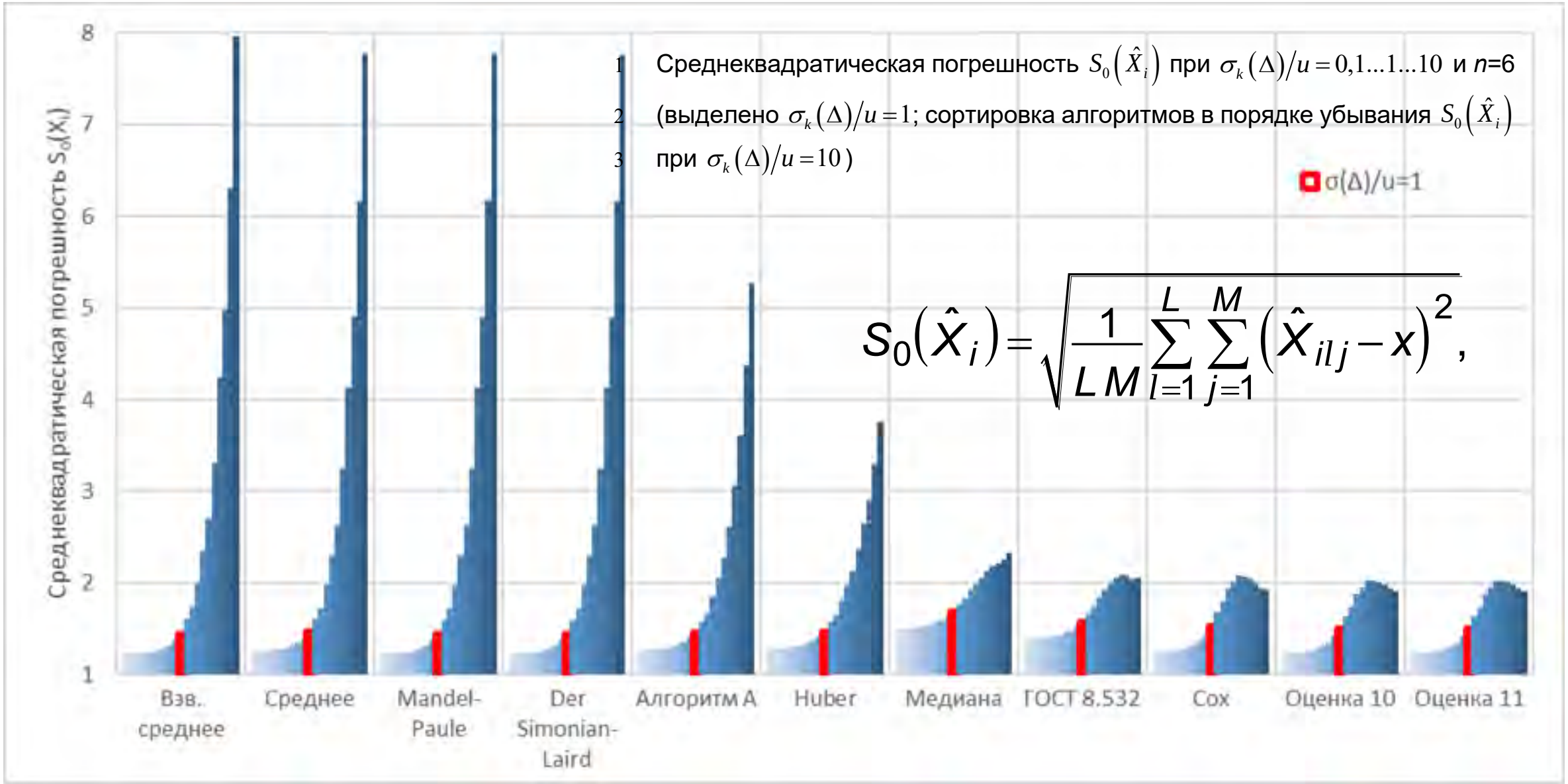
$$S_0\left(\hat{X}_i\right) = \sqrt{\frac{1}{LM}\sum_{l=1}^{L}\sum_{j=1}^{M}\left(\hat{X}_{ilj} - x\right)^2},$$

- Среднее по квадратам значение неопределенности

$$u\left(\hat{X}_i\right) = \sqrt{\frac{1}{LM}\sum_{l=1}^{L}\sum_{j=1}^{M}u^2\left(\hat{X}_{ilj}\right)}.$$

Результаты

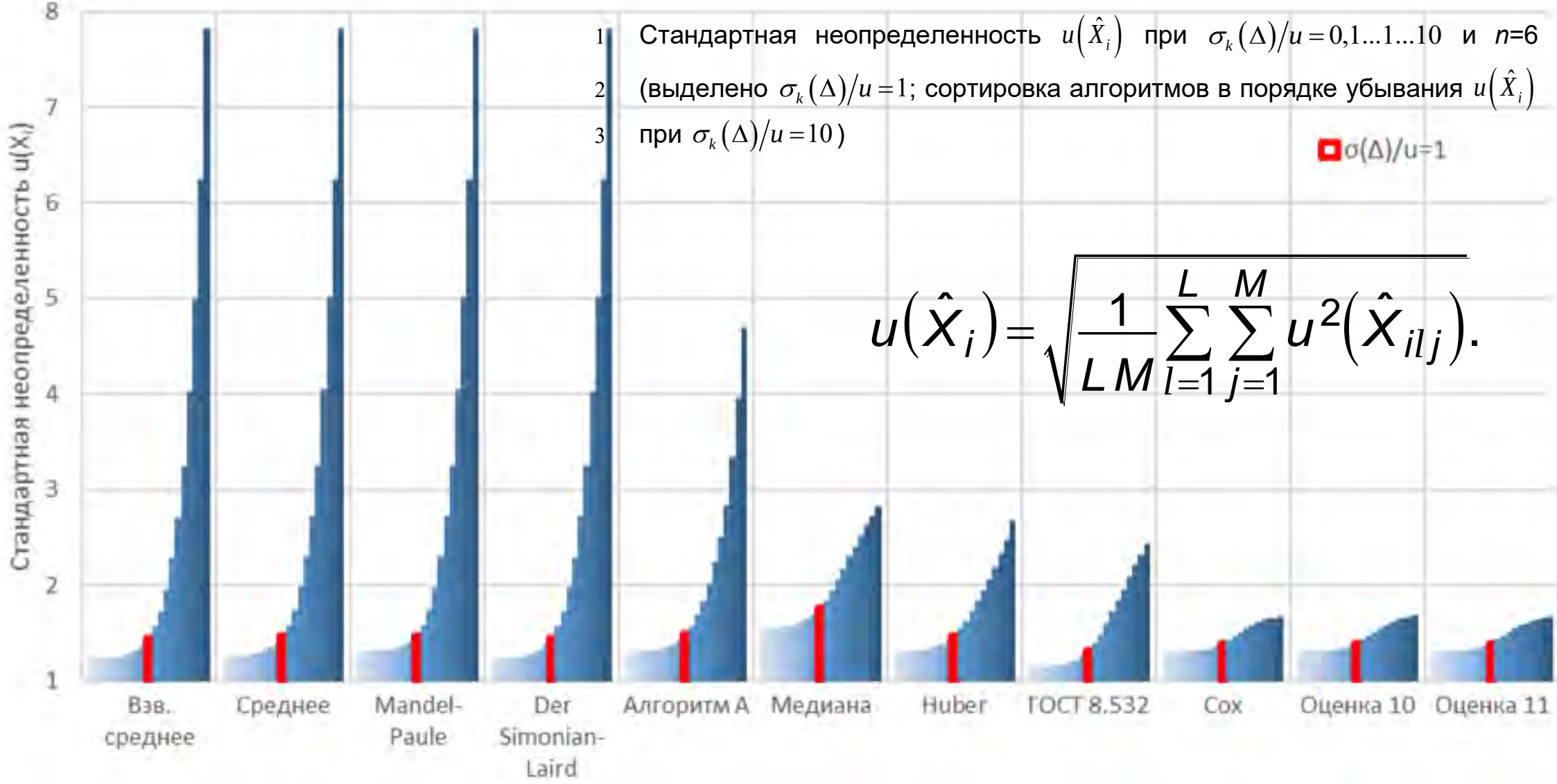
1. Среднеквадратическая погрешность $S_0\left(\hat{X}_i\right)$ при $\sigma_k(\Delta)/u = 0{,}1 \ldots 1 \ldots 10$ и n=6
2. (выделено $\sigma_k(\Delta)/u = 1$; сортировка алгоритмов в порядке убывания $S_0\left(\hat{X}_i\right)$
3. при $\sigma_k(\Delta)/u = 10$)



$$S_0\left(\hat{X}_i\right) = \sqrt{\frac{1}{LM}\sum_{l=1}^{L}\sum_{j=1}^{M}\left(\hat{X}_{ilj} - x\right)^2},$$

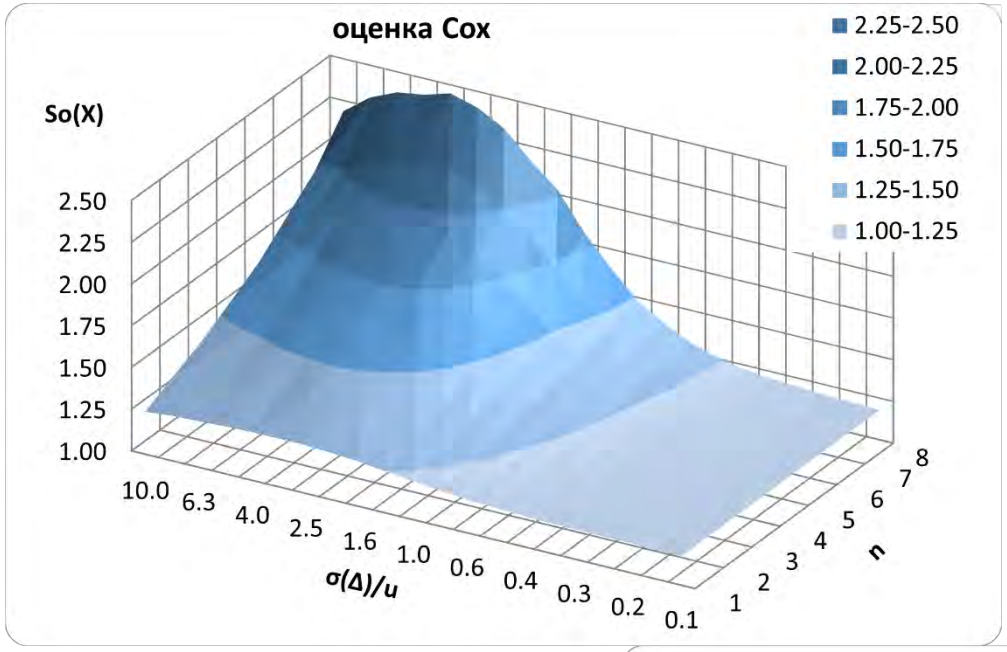
Результаты

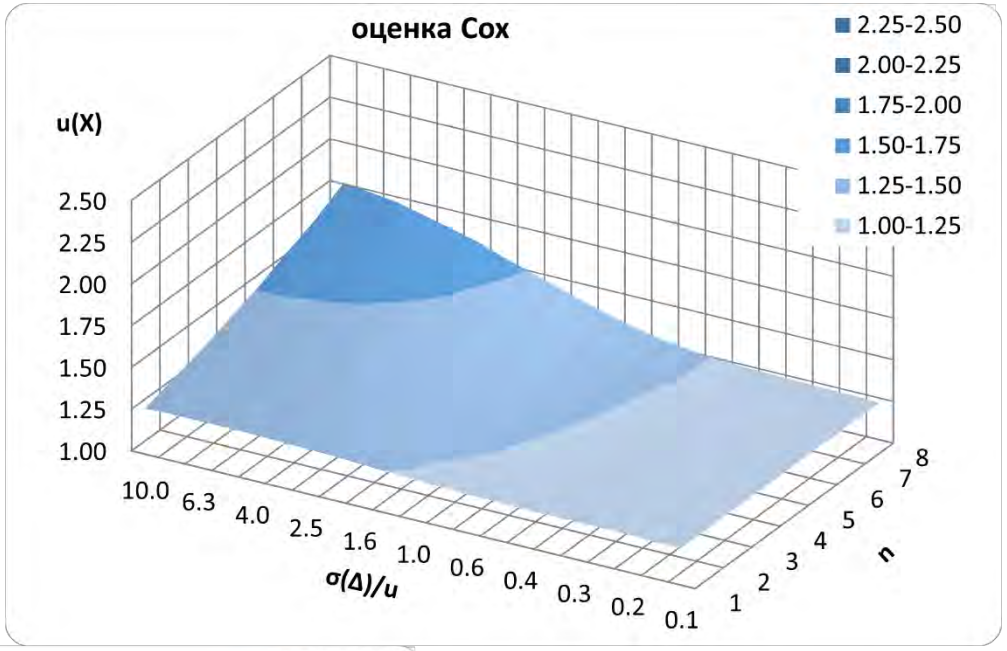
1. Стандартная неопределенность $u\left(\hat{X}_i\right)$ при $\sigma_k(\Delta)/u = 0{,}1 \ldots 1 \ldots 10$ и n=6
2. (выделено $\sigma_k(\Delta)/u = 1$; сортировка алгоритмов в порядке убывания $u\left(\hat{X}_i\right)$
3. при $\sigma_k(\Delta)/u = 10$)

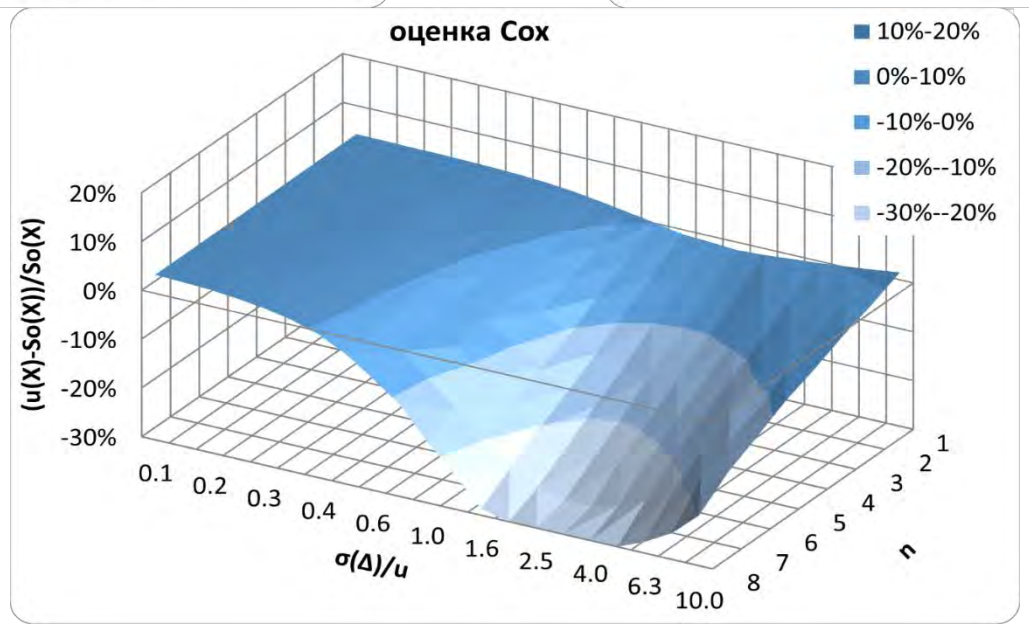


$$u\left(\hat{X}_i\right) = \sqrt{\frac{1}{L\,M}\sum_{l=1}^{L}\sum_{j=1}^{M} u^2\left(\hat{X}_{ilj}\right)}.$$

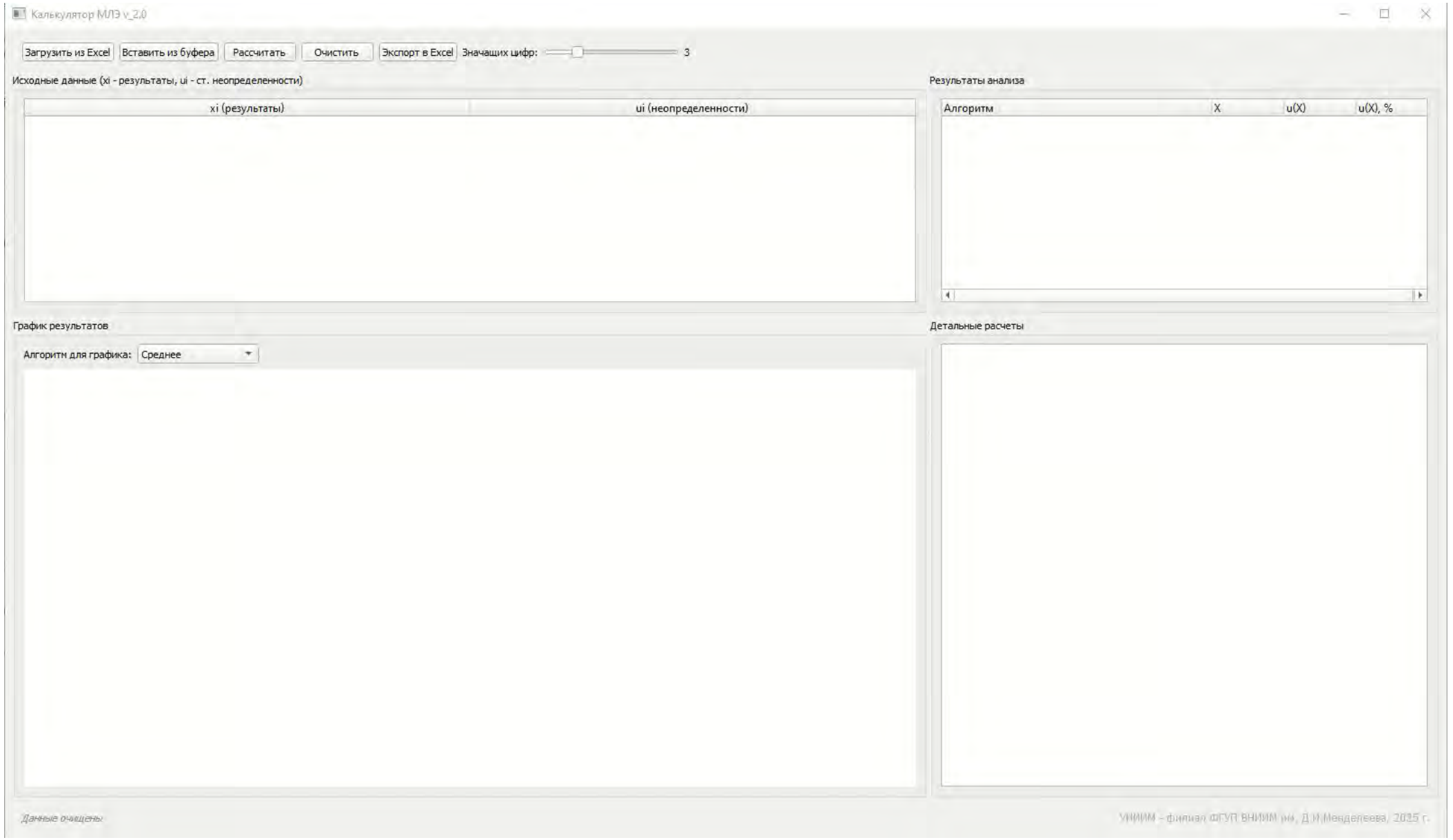
Алгоритм Мориса Кокса







Программное обеспечение



Выводы

1. Самые высокие значения стандартной неопределенности аттестованного значения характерны, в случае, когда для вычисления аттестованного значения СО используются следующие алгоритмы: среднеарифметическое, средневзвешенное, оценки Mandel-Paule и DerSimonian-Laird. Причем данные алгоритмы не устойчивы к выбросам и к значениям СКО величины сдвигов.
2. Средние значения стандартной неопределенности аттестованного значения характерны для следующих алгоритмов: медиана, оценка Huber, оценка по ГОСТ 8.532, алгоритм А с итеративной шкалой по ГОСТ 50779.60.
3. Алгоритм Мориса Кокса и оригинальные алгоритмы 10-12, базирующиеся на идее нахождения «наибольшего согласованного подмножества» экспериментальных данных, обеспечивают наиболее устойчивую оценку у выборок, имеющих большее количество значительных сдвигов, т.е. показывают наибольшую устойчивость оценки аттестованного значения СО, которое не имеет статистически значимого смещения и имеет меньшие значения стандартной неопределенности межлабораторной характеризации СО. Следует отметить, что недооценка рассчитанного значения при количество выбросов 4 из 16 не превышает 10 %, что делает данную оценку близкой к наблюдаемой при моделировании методом Монте-Карло.
4. Эксперимент показал, что количество участников МЛЭ, имеющих значимые смещения не должно превышать 4 из 16. Моделирование с другими N показало, что в общем случае должно выполняться неравенство $n \leq \sqrt{N}$, для корректной обработки результатов МЛЭ. В противном случае алгоритмы группы Кокса приводят к заниженной оценке u(Xi), а остальные алгоритмы быстро теряют устойчивость.
5. Рассмотренные алгоритмы позволяют оценить стандартную неопределённость типа А, которая учитывает данные статистической обработки результатов МЛЭ, однако никак не учитывает априорную информацию и источники неопределённости типа В, что крайне важно для установления метрологической прослеживаемости.

Прослеживаемость в МЛЭ

В результате МЛЭ

$\hat{X}$ Сертифицированное значение ССО

$u_A\left(\hat{X}\right)$ Стандартная неопределенность МЛЭ

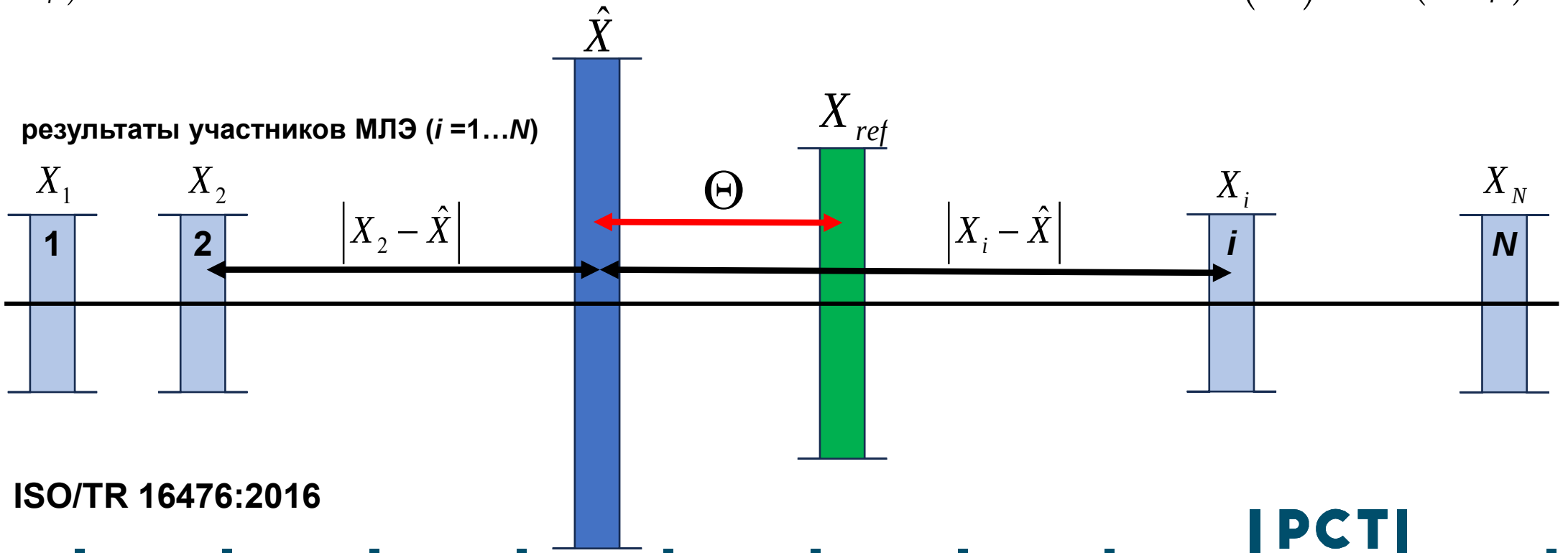
X_{ref} Опорное значение

$u\left(X_{ref}\right)$ Стандартная неопределенность опорного значения

$$u_{char} \neq u_A\left(\hat{X}\right)$$

$$\Theta = \left|\hat{X} - X_{ref}\right|$$

$$u_{char}^{\ 2} = u_A^{\ 2}\left(\hat{X}\right) + u^2\left(X_{ref}\right) + \left(\Theta/2\right)^2$$



ISO/TR 16476:2016

Спасибо за внимание!



РОССИЙСКАЯ ФЕДЕРАЦИЯ

RU 2025691595

ФЕДЕРАЛЬНАЯ СЛУЖБА
ПО ИНТЕЛЛЕКТУАЛЬНОЙ СОБСТВЕННОСТИ

(12) **ГОСУДАРСТВЕННАЯ РЕГИСТРАЦИЯ ПРОГРАММЫ ДЛЯ ЭВМ**

Номер регистрации (свидетельства):
2025691595

Дата регистрации: **14.11.2025**

Номер и дата поступления заявки:
2025690759 07.11.2025

Дата публикации и номер бюллетеня:
14.11.2025 **Бюл. № 11**

Авторы:
Мигаль Павел Вячеславович (RU),
Аронов Петр Михайлович (RU)

Правообладатель:
Федеральное государственное унитарное предприятие «Всероссийский научно-исследовательский институт метрологии им. Д.И. Менделеева» (RU)

Название программы для ЭВМ:
«Калькулятор МЛЭ»

Sobina, E.P., Aronov, P.M., Migal, P.V. *et al.* Reference materials: selection of algorithm for estimating the certified value and its uncertainty based on the results of an interlaboratory experiment. *Meas Tech* **68**, 473–490 (2025). https://doi.org/10.1007/s11018-025-02468-5