

Введение	1
Модель ошибок БЧЭ	2
Алгоритм моделирования	3
Измерения с отключенной термокамерой	3
Измерения с включенной термокамерой	4
Нахождение линейной функции ошибки	5
Калибровка	6
Результат работы	7
Вывод	8
Список литературы	9

Введение

Целью работы является рассмотрение и моделирование калибровки ВОГ БИНС для малогабаритного низкоорбитального спутника методом навигационного решения в динамических условиях движения объекта в рабочем диапазоне температур. В качестве объекта исследования возьмем ВОГ из курсового проекта *ОИУС 501*.

Для достижения поставленной цели были решены следующие задачи:

- Были выработаны требования к точности определения коэффициентов модели погрешностей БИНС ($\leq 2e-5$).
- Описан метод калибровки БЧЭ в термокамере в условиях динамически изменяемой температуры в рабочем диапазоне температур.
- Разработана модель нахождения температурных уходов и нестабильностей смещения нуля ВОГ.

Модель ошибок БЧЭ

В первую очередь запишем паспортные параметры температурных уходов ВОГ:

- $k_t = 0.002 \text{ } ^\circ/\text{ч}$ - случайная составляющая дрейфа сигнала при постоянной температуре (100 сек осреднение).
- $k_{dt} = 0.1 \text{ } ^\circ/\text{ч}$ - случайная составляющая дрейфа нулевого сигнала при изменении температуры в рабочем диапазоне (100 сек осреднение).
- Рабочий диапазон температур: $[-40, 60] \text{ } ^\circ\text{C}$

Рассмотрим модель ошибок ВОГ'ов с учетом влияния температуры и скорости ее изменения на параметры:

$$V = V_{\text{изм}} k_{sf} + V_0 + k_t(T) + k_{dt}(dT);$$

V – значение, измеренное ВОГ'ом;

$V_{\text{изм}}$ – измеряемое значение;

k_{sf} – масштабный коэффициент;

V – смещение нуля;

T, dT – температура и изменение температуры в момент времени ВОГ'а.

Стоит отметить, что в ходе моделирования я не буду рассматривать влияние температурного градиента на выходные параметры ВОГ'а, так как его влияние мало в сравнении с влиянием изменения температуры прибора (см *статья 1: [стр 110], статья 2: [стр 9]*).

Алгоритм моделирования

Калибровка температурных коэффициентов ВОГ'а в режиме навигации проводится следующим образом: прибор размещается на движущемся основании - поворотном столе с термокамерой, так, чтобы ось его чувствительности совпадала с осью вращения стола. Гироскоп измеряет известную нам с необходимой точностью угловую скорость вращения основания в течение *12 минут* в условиях изменяющейся температуры в рабочем диапазоне с частотой *20 Гц*. После этого, измерения гироскопа фиксируются, и процесс повторяется при изменении направления вращения основания.

В процессе калибровки будем считать, что рассматриваемые гироскопы откалиброваны, следовательно такими параметрами ошибок как остаточное смещение нуля и остаточный масштабный коэффициент мы пренебрежем вследствие их малости.

В качестве поворотного стола выберем *Actidyn ST1300* со следующими параметрами:

- Рабочий диапазон климатической (термо-) камеры: $[-55, 185] ^\circ\text{C}$.
- Точность позиционирования: $1'' = 4,8481\text{e-}6 \text{ рад}$;

Моделирование будем проводить в несколько этапов:

1. Измерения с отключенной термокамерой

Получим показания прибора в условиях постоянной комнатной температуры. Зададим скорость вращения поворотного стола в $10 ^\circ/\text{мин} = 0.0029 \text{ рад/сек}$:

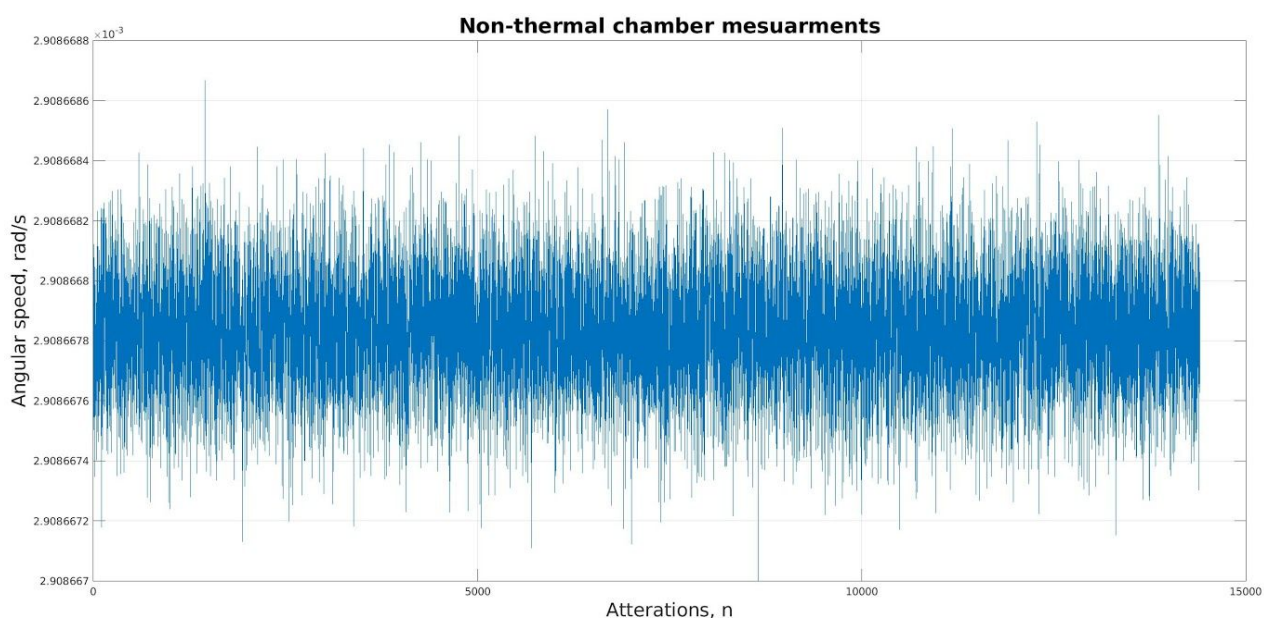


Рис 1: Измерения ВОГ с отключенной термокамерой.

2. Измерения с включенной термокамерой

Повторим измерения на предыдущем этапе, включив при этом термокамеру. Зададим условие изменения температуры прибора в соответствии с *Рис 2*. Результаты измерения угловой скорости зафиксируем и сравним на графике с измерениями, полученными на предыдущем этапе (*Рис 3*):

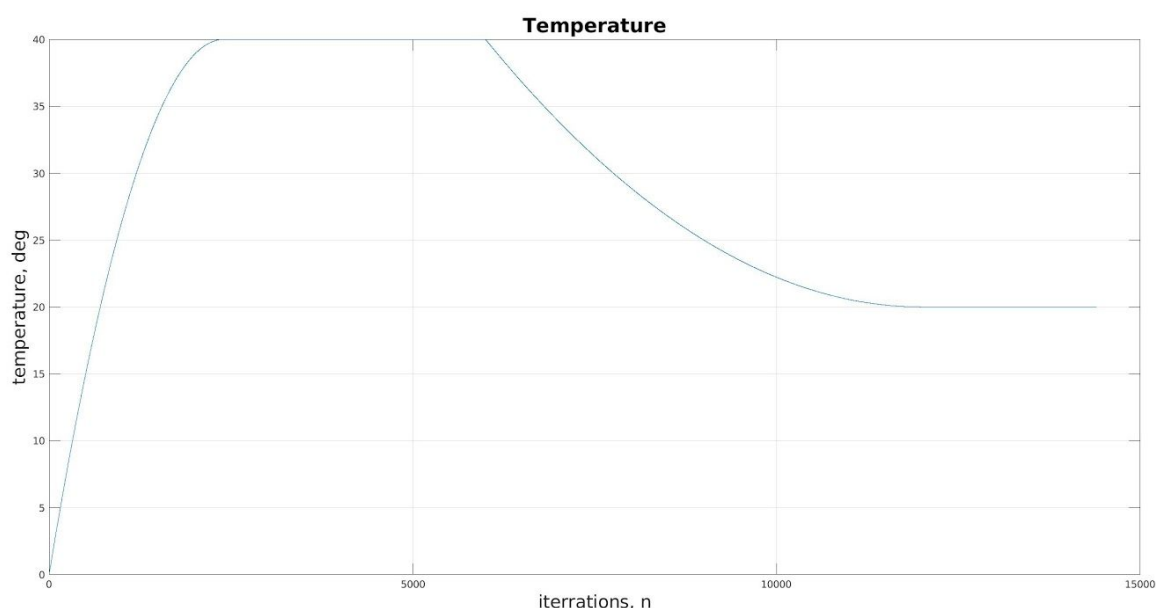


Рис 2: Нагрев ВОГ.

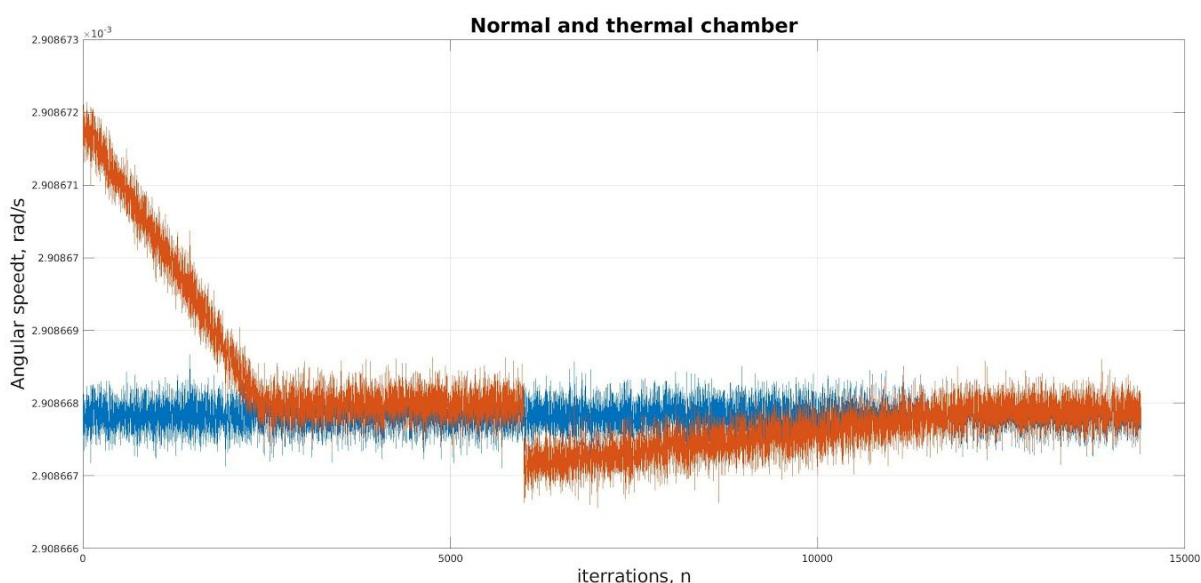


Рис 3: Сравнение измеренной скорости с учетом температурных коэффициентов и без.

Как видно из *Рис 1*, *Рис 2* и *Рис 3* выходной сигнал гироскопа в большей степени зависит от скорости изменения температуры, чем от ее значения в рабочем диапазоне. Также из графиков видно, что зависимость выходного сигнала гироскопа от температуры линейна, это значит, что для проведения калибровки нам будет достаточно найти линейную функцию ошибки по T °C.

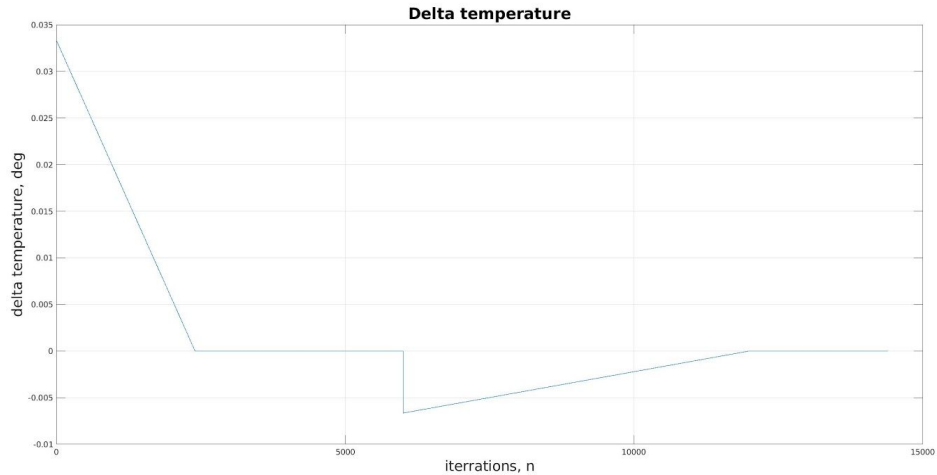


Рис 4: График изменения температуры (dT) в термокамере.

3. Нахождение линейной функции ошибки

Определим параметры линейной функции ошибки по температуре: для этого рассчитаем среднее измеренное значение угловой скорости поворотного стола в первом и во втором эксперименте при постоянных температурах. При 20 °С:

$$k1_{40} = \frac{1}{n} \sum_{i=2400}^{n=6000} (V_i + t_k(T) + t_{dt}(dT));$$

$$k2_{40} = \frac{1}{n} \sum_{i=2400}^{n=6000} (-V_i + t_k(T) + t_{dt}(dT));$$

$$K_{40} = (k1_{40} + k2_{40}) / 2 = 2.8484e - 9 \text{ рад/с};$$

Аналогично для 40 °С:

$$k1_{20} = \frac{1}{n} \sum_{i=12000}^{n=144000} (V_i + t_k(T) + t_{dt}(dT));$$

$$k2_{20} = \frac{1}{n} \sum_{i=12000}^{n=144000} (-V_i + t_k(T) + t_{dt}(dT));$$

$$K_{20} = (k1_{20} + k2_{20}) / 2 = 9.0831e - 10 \text{ рад/с};$$

Найдем коэффициенты линейной функции ошибки по температуре, запишем уравнение прямой, построив его по двум точкам:

$$k_t = (-C - A t) / B;$$

$$A = K_{40} - K_{20};$$

$$B = 20^\circ\text{C} - 40^\circ\text{C};$$

$$C = 40 K_{20} - 20 K_{40};$$

$$kc_t = (2.0610e - 8 - 1.9882e - 9 t) / (-20);$$

Аналогично найдем функцию ошибки по изменению температуры, только в этом случае можно сразу найти точки обе точки, зная дрейф гироскопа

и изменение температуры в любой момент времени, при условии, что $dt \neq 0$:

$$kc_{dt} = (-1.5314e - 10 - 7.4469e - 08 t) / (0.0330);$$

4. Калибровка

Добавим в уравнение ошибок ВОГ калибровочные параметры и измерим скорость вращения поворотного стола, построим графики с исходными, откалиброванными и неоткалиброванными измерениями (Рис 5).

$$V = V_{\text{изм}} k_{sf} + V_0 + k_t(T) + k_{dt}(dT) - kc_t(T) - kc_{dt}(dT);$$

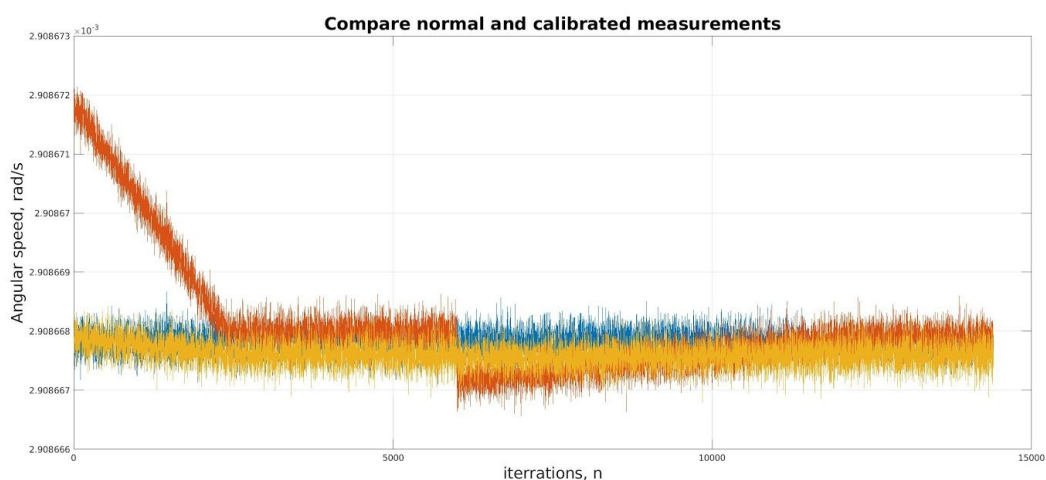


Рис 5: Синий - исходные измерения, Красный - неоткалиброванные измерения, Желтый - откалиброванные измерения.

Построим график, отражающий точность работы алгоритма калибровки, как разницу между исходным, незашумленным температурными ошибками графиком измеренной угловой скорости и откалиброванным:

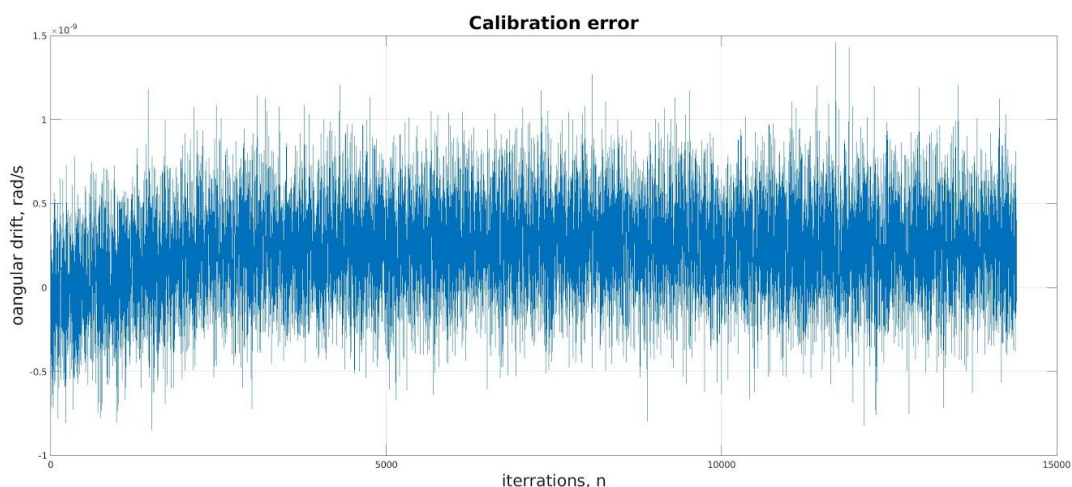


Рис 6: Точность работы алгоритма

Результат работы

Сравним получившиеся температурные коэффициенты и паспортными:

$$\Delta k_t = |k_t(-40 : 60) - k_{c_t}(-40 : 60)| = 9.6956e - 09 - 9.0571e - 09 = 2.3380e - 10 \text{ рад/с};$$

$$\Delta k_{dt} = |k_{dt}(-40 : 60) - k_{c_{dt}}(-40 : 60)| = 9.6956e - 09 - 9.0571e - 09 = 1.7000e - 05 \text{ рад/с};$$

Также сравним полученные линейные функции с паспортными:

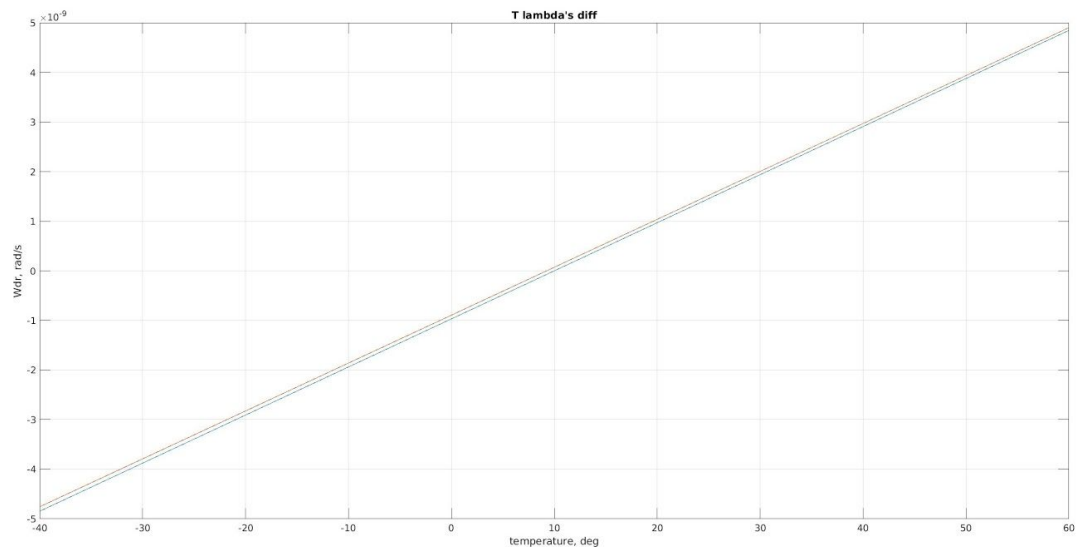


Рис 7: Линейные функции ошибки по температуре:

Синяя - реальная, Красная - вычисленная

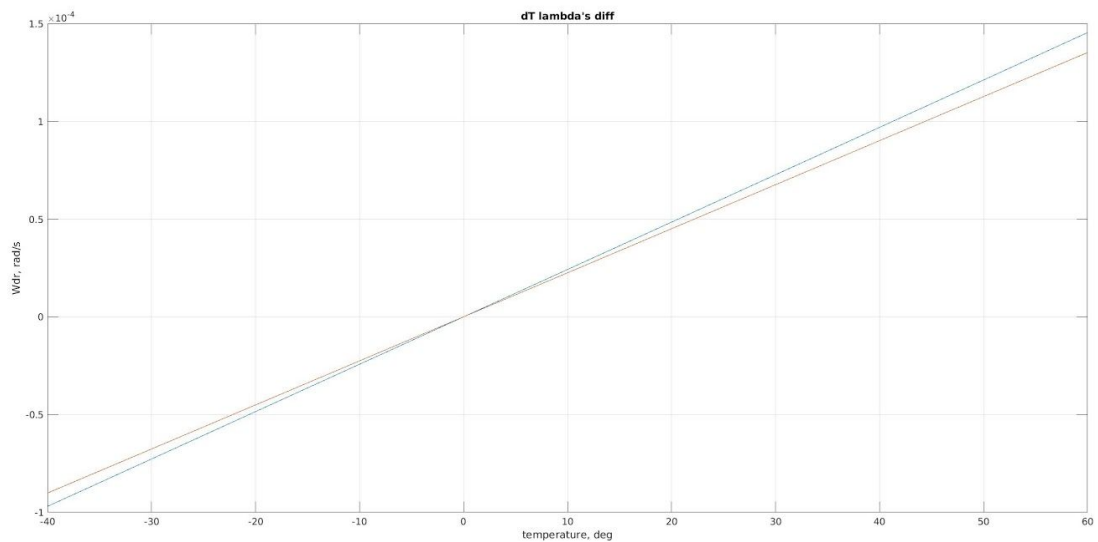


Рис 8: Линейные функции ошибки по изменению температуры:

Синяя - реальная, Красная - вычисленная

Вывод

В ходе выполнения данной работы мною была промоделирована работа БИНС на ВОГ'ах в условиях переменной температуры. В результате моделирования были построены линейные функции зависимости выходного сигнала ВОГ от температуры и ее изменения, найдены коэффициенты температурных дрейфов ВОГ в модели ошибок. описана и реализована калибровка прибора навигационным методом.

Алгоритм калибровки был реализован с помощью программного пакета MATLAB.

Проанализировав результаты калибровки, можно сказать, что выходной сигнал ВОГ в большей степени зависит от скорости изменения температуры ВОГ'а, чем от величины температуры.

Список литературы

1. Русапов А. В. ИССЛЕДОВАНИЕ МЕТОДОВ ЛОКАЛЬНОГО ТЕМПЕРАТУРНОГО ВОЗДЕЙСТВИЯ ДЛЯ КОМПЕНСАЦИИ ДРЕЙФА ВОЛОКОННО-ОПТИЧЕСКОГО ГИРОСКОПА, Санкт-Петербург, 2014:
https://isu.ifmo.ru/pls/apex/f?p=2109:0:0:AWNLD_F:NO::FILE,FDIS:03FA365A54B1D83E9595BF5311453B5D,M
2. Драницына Е. В., КАЛИБРОВКА ИЗМЕРИТЕЛЬНОГО МОДУЛЯ ПРЕЦИЗИОННОЙ БИНС НА ВОЛОКОННО-ОПТИЧЕСКИХ ГИРОСКОПАХ, Санкт-Петербург, 2016:
<https://etu.ru/assets/files/nauka/dissertacii/2016/Dranicina/Avtoreferat-Dranicina.pdf>