

- Алейник Артем Сергеевич* – Россия, Санкт-Петербург, Санкт-Петербургский национальный исследовательский университет информационных технологий, механики и оптики, кандидат технических наук, доцент, artemal@rambler.ru
- Дейнека Иван Геннадьевич* – Россия, Санкт-Петербург, Санкт-Петербургский национальный исследовательский университет информационных технологий, механики и оптики, аспирант, vanodnk@gmail.com
- Макаренко Александр Александрович* – Россия, Санкт-Петербург, Санкт-Петербургский национальный исследовательский университет информационных технологий, механики и оптики, кандидат технических наук, доцент, a\_makarenko@mail.ru
- Мехреньгин Михаил Викторович* – Россия, Санкт-Петербург, Санкт-Петербургский национальный исследовательский университет информационных технологий, механики и оптики, аспирант, mehrengin@gmail.com
- Стригалеv Владимир Евгеньевич* – Россия, Санкт-Петербург, Санкт-Петербургский национальный исследовательский университет информационных технологий, механики и оптики, кандидат физ.-мат. наук, профессор, vstrglv@mail.ru

УДК 528.526.6

## **ВЛИЯНИЕ ТЕМПЕРАТУРНОЙ НЕСТАБИЛЬНОСТИ ХАРАКТЕРИСТИК ИСТОЧНИКА НА ПОКАЗАНИЯ ВОЛОКОННО-ОПТИЧЕСКОГО ГИРОСКОПА**

**И.А. Шарков, А.В. Рупасов, В.Е. Стригалеv, С.А. Волковский**

Рассматривается вопрос влияния температурной нестабильности источника излучения на выходной сигнал волоконно-оптического гироскопа, построенного по схеме с обратной связью. Известно, что нагрев источника в основном приводит к изменению величины масштабного коэффициента. В работе произведен расчет влияния величины центральной длины волны эрбиевого широкополосного источника на величину масштабного коэффициента и сигнал волоконно-оптического гироскопа. При скорости вращения прибора  $13^\circ/\text{ч}$  (скорость вращения Земли) ошибка определения скорости должна составить  $d\Omega_{\text{ош}}=7,2 \cdot 10^{-5} (^\circ/\text{ч}) \cdot \text{K}^{-1}$ , но уже при скорости вращения  $1^\circ/\text{ч}$  ошибка составит  $d\Omega_{\text{ош}}=1,9 \cdot 10^{-2} (^\circ/\text{ч}) \cdot \text{K}^{-1}$ . Полученный результат сравнен с экспериментальными данными, полученными при нагреве источника в термокамере при детектировании скорости вращения Земли. При этом ошибка определения скорости составила  $d\Omega_{\text{ош}}=3 \cdot 10^{-3} (^\circ/\text{ч}) \cdot \text{K}^{-1}$ , т.е. значительно больше рассчитанной ранее для масштабного коэффициента. Дополнительный эксперимент с переворотом плоскости гироскопа на  $180^\circ$  показал, что обнаруженная ошибка связана с дрейфом нуля, а не с изменением масштабного коэффициента. Очевидно, что возникающая при нагреве источника излучения ошибка показаний волоконно-оптического гироскопа (из-за дрейфа нуля и изменения масштабного коэффициента) не позволяет достичь необходимой точности волоконно-оптического гироскопа в  $0,01^\circ/\text{ч}$  ( $1\sigma$ ) уже при незначительном изменении температуры. Полученные в работе данные обусловили необходимость доработки источника и введения механизма термостабилизации его активных элементов.

**Ключевые слова:** ВОГ, тепловой дрейф ВОГ, эрбиевый широкополосный источник излучения, дрейф нуля ВОГ, дрейф масштабного коэффициента ВОГ.

### **Введение**

Уже несколько десятилетий волоконно-оптические гироскопы (ВОГ) успешно используются в системах навигации, ориентации и стабилизации. В настоящее время ВОГ производятся многими индустриально развитыми странами – США (Northrop Grumman, KVH Industries, Honeywell), Франция (IXSEA) и др. По своим точностным и эксплуатационным характеристикам ВОГ не уступают другим типам гироскопов, а по ряду параметров, таких как меньшая себестоимость, отсутствие вращающихся частей, больший срок службы, меньшее время выхода на режим и т.д., даже превосходят их. ВОГ выделяется среди других приборов навигации наибольшей сложностью и многообразием происходящих в нем физических явлений [1].

Существует ряд публикаций ([2–9] и др.), в которых обсуждается проблема теплового дрейфа. На основе этих материалов можно с уверенностью сказать о невозможности создания ВОГ навигационного класса точности без учета влияния температурного дрейфа.

Исследования влияния температуры на активные элементы (источник, волоконно-оптический контур, модулятор и т.д.) разрабатываемого ВОГ также показали наличие большого количества различных процессов, приводящих к изменению характеристик элементов при их нагреве и соответственно к дрейфу показаний ВОГ. Целью настоящей работы является исследование влияния температурной нестабильности характеристик источника излучения на показания волоконно-оптического гироскопа.

### **Влияние источника излучения на стабильность масштабного коэффициента**

Как известно, работа волоконно-оптического гироскопа основана на эффекте Саньяка, заключающемся в том, что при вращении волоконно-оптического интерферометра со скоростью  $\Omega$  лучи, распро-

страняющиеся в противоположных направлениях, приобретают набег фаз  $\Delta\varphi$ , пропорциональный действующей угловой скорости [10]:

$$\Delta\varphi = \frac{4\pi RL}{\lambda_c c} \Omega, \quad (1)$$

где  $\lambda_c$  – центральная длина волны;  $c$  – скорость света;  $R$  – радиус катушки;  $L$  – длина волокна.

Множитель, стоящий перед  $\Omega$ , обычно рассматривают как масштабный коэффициент (МК). Из (1) видно, что стабильность центральной длины волны напрямую влияет на значение МК:

$$\text{МК} = \frac{4\pi RL}{\lambda_c c}$$

В [1] указано, что для создания ВОГ навигационного класса изменение центральной длины волны источника должно быть меньше  $10^{-6} \text{ K}^{-1}$ . Помимо высокой стабильности характеристик, к источнику предъявляется еще ряд требований, в том числе экономических.

В рамках работы еще на первых этапах разработки ВОГ был проведен поиск и анализ литературных источников отечественных и западных изданий, посвященных применению источников оптического излучения в ВОГ. Очевидно, что для уменьшения эффекта паразитных интерферометров необходимо использовать неполяризованный широкополосный источник излучения [1, 2, 9, 11]. Широкополосные полупроводниковые источники имеют малую степень поляризации, однако их применение допустимо лишь в ВОГ с точностью порядка  $1^\circ/\text{ч}$ . Связано это с тем, что характеристики полупроводниковых источников сильно подвержены внешним факторам, в частности, имеется сильная зависимость спектра от температуры и тока накачки. Но самым негативным является то, что данный тип источников подвержен процессам старения, в ходе которых у него изменяется спектр. В процессе эксплуатации ВОГ это приводит к непредсказуемым изменениям и уходу масштабного коэффициента [2]. Исходя из этого, преимущество было отдано эрбиевому широкополосному источнику, достоинства которого по сравнению с полупроводниковыми описаны в работе [5].

#### Расчет влияния стабильности центральной длины волны на стабильность масштабного коэффициента

В рамках работы были исследованы образцы выбранных волоконных эрбиевых широкополосных источников на наличие зависимости длины волны источника света от температуры (рис. 1). Видно, что нагрев приводит к изменению спектра.

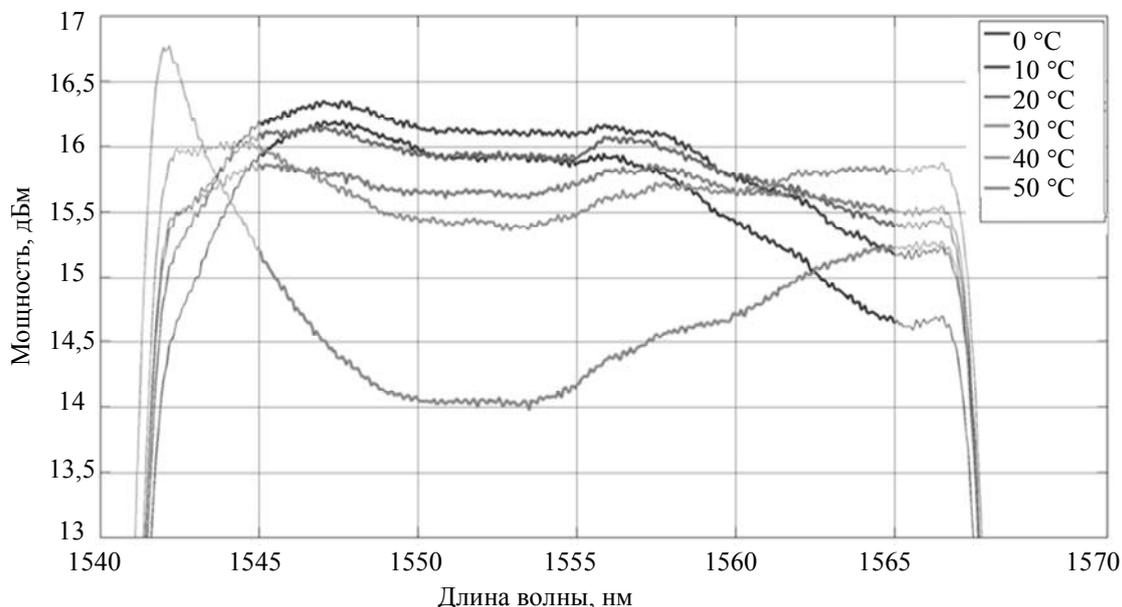


Рис. 1. Влияние температуры на спектр источника излучения при стабилизации по мощности (данные предоставлены производителем источника)

Для полученных спектров были вычислены центральные длины волн источника при различных температурах. Абсолютное изменение центральной длины волны излучения источника при измерении температуры от 0 до 50 °C ( $\Delta T=50 \text{ K}$ ) составляет  $\Delta\lambda = 0,43 \text{ нм}$  (данные предоставлены производителем источника). Для вычисления ошибки МК из-за изменения центральной длины волны продифференцируем (1):

$$\frac{d\varphi}{d\lambda} = \frac{4\pi RL}{c \cdot \lambda^2} \Omega;$$

$$d\varphi = \frac{4\pi RL}{c\lambda} \frac{d\lambda}{\lambda} \Omega = \frac{d\lambda}{\lambda} \text{МК} \cdot \Omega;$$

$$\frac{d\varphi}{\varphi} = \frac{d\lambda}{\lambda}. \quad (2)$$

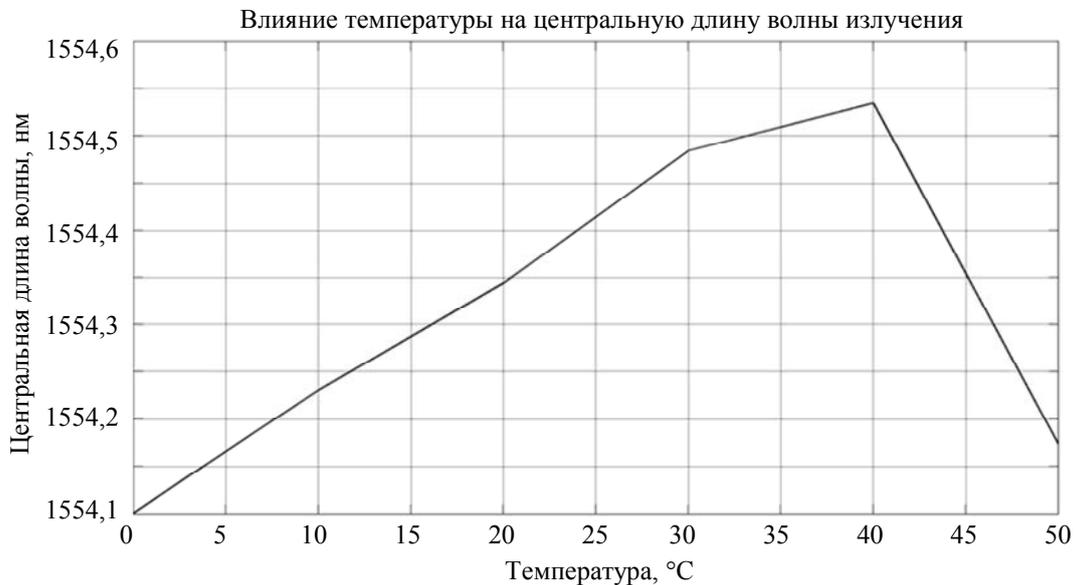


Рис. 2. Влияние температуры на центральную длину волны источника при стабилизации по мощности (данные предоставлены производителем источника)

Подставляя полученные экспериментальные данные в (2), получим относительное изменение детектируемой фазы на 1К:

$$\frac{d\varphi}{\varphi} = \frac{\Delta\lambda}{\lambda_{cp} \Delta T} = 5,53 \cdot 10^{-6} \text{ К}^{-1}.$$

При скорости вращения Земли (~13 °/ч) абсолютная ошибка определения скорости вращения составит

$$d\Omega_{\text{ош}} = \frac{d\varphi}{\varphi} \Omega,$$

$$d\Omega_{\text{ош}} = 7,2 \cdot 10^{-5} \left( \text{°/ч} \right) \cdot \text{К}^{-1}.$$

При скорости вращения 1°/с (3600 °/ч), которую должен детектировать ВОГ, ошибка уже составит  $1,9 \cdot 10^{-2} \left( \text{°/ч} \right) \cdot \text{К}^{-1}$ , что превышает запланированную погрешность ВОГ в 0,01 °/ч.

#### Экспериментальное исследование влияния источника излучения на сигнал ВОГ

Для сравнения полученной выше зависимости МК от температуры источника с реальным дрейфом ВОГ были проведены исследования, целью которых являлось экспериментальное определение влияния температурной нестабильности характеристик (мощность, спектр, поляризация) источника излучения на выходной сигнал гироскопа. В ходе экспериментов источник помещался в термокамеру с изменяющейся температурой в диапазоне от +15°С до +30°С. Сам ВОГ помещался в камеру со стабильной температурой +15°С. Результаты эксперимента приведены на рис. 3.

Абсолютная ошибка определения скорости вращения (при скорости вращения Земли ~13 °/ч) на 1К составила

$$d\Omega_{\text{ош}} = \frac{\Omega(t = 21,38) - \Omega(t = 21,86)}{\Delta T} = 0,003 \left( \text{°/ч} \right) \cdot \text{К}^{-1}$$

Для отделения дрейфа нуля от ухода МК был повторен предыдущий эксперимент, в котором был произведен поворот плоскости волоконно-оптического контура на 180°. Полученные результаты приведены на рис. 4.

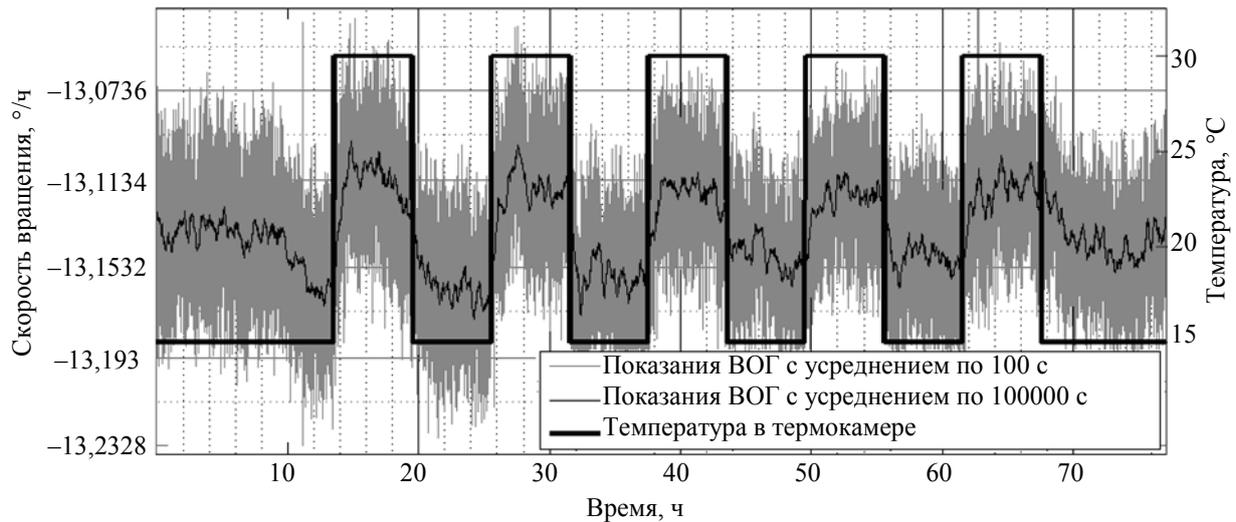


Рис. 3. Влияние температуры источника на показания ВОГ (источник в режиме стабилизации по оптической мощности). Среднеквадратичное отклонение (СКО) составило 0,05 при усреднении по 100 с

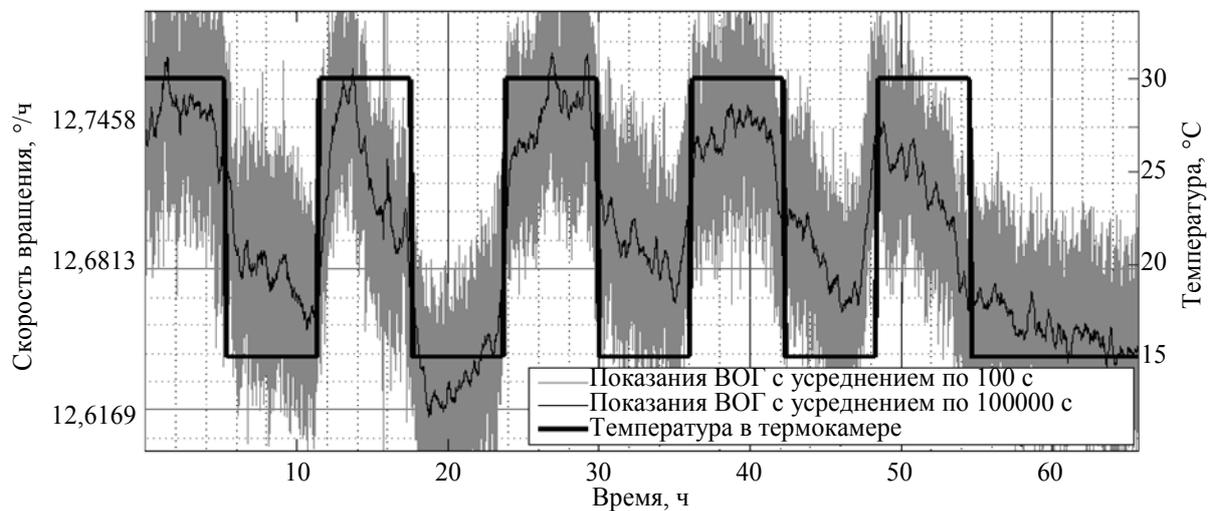


Рис. 4. Влияние температуры источника на показания ВОГ после переворота (источник в режиме стабилизации по оптической мощности). СКО составило 0,05 при усреднении по 100 с

Дрейф показаний ВОГ на составил

$$d\Omega_{\text{ош}} = \frac{\Omega(t = 21,38) - \Omega(t = 21,86)}{\Delta T} = 0,004 \left( \frac{^\circ}{\text{ч}} \right) \cdot \text{K}^{-1}.$$

Ошибка, возникающая при нагреве источника, оказалась больше, чем рассчитанная ранее для МК, что связано в большей степени с дрейфом нуля, а не с уходом МК. Провести исследование влияния температуры источника на показания ВОГ при больших скоростях вращения, к сожалению, на данный момент не представляется возможным из-за технических ограничений используемого оборудования: для этого эксперимента необходимо осуществлять вращение двух термокамер. Сам механизм влияния температуры источника на дрейф нуля на данный момент исследуется. Однако, очевидно, обнаруженный дрейф нуля не позволяет достичь необходимой точности ВОГ в 0,01°/ч даже при низких скоростях вращения и при незначительном изменении температуры.

### Заключение

В ходе работы было выявлено, что температурная нестабильность источника излучения при больших скоростях вращения оказывает наибольшее влияние на изменение масштабного коэффициента, но при малых скоростях вращения более значимым становится экспериментально обнаруженный дрейф нуля. Возникающая при этом ошибка показаний волоконно-оптического гироскопа (из-за дрейфа нуля и изменения масштабного коэффициента) не позволяет достичь необходимой точности волоконно-оптического гироскопа в 0,01°/ч (1σ) уже при незначительном изменении температуры источника.

Полученные данные послужили толчком для исследования методов повышения стабильности спектра, мощности и степени поляризации источника излучения. Оказалось, что у используемого в экс-

периментальных волоконно-оптических гироскопах широкополосного эрбиевого источника отсутствует система термостабилизации диодов накачки и оптического фильтра. С производителем было достигнуто соглашение об установке элементов Пельтье на активные элементы с целью уменьшения влияния температуры на выходные характеристики источника.

Помимо этого, в алгоритм обработки оптического сигнала, детектируемого фотоприемником, было предложено добавить механизм нормировки, позволяющий уменьшить влияние нестабильности характеристик источника во времени на дрейф нуля в сигнале волоконно-оптического гироскопа.

Работа выполнена в НИУ ИТМО при финансовой поддержке Министерства образования и науки Российской Федерации (проект № 02.G25.31.0044).

#### Литература

1. Листвин В.Н., Логозинский В.Н. Волоконно-оптический датчик вращения // Физоптика, 2011 [Электронный ресурс]. – URL: [www.fizoptika.ru/description/book\\_bind.pdf](http://www.fizoptika.ru/description/book_bind.pdf), свободный. Яз. рус. (дата обращения 10.10.1013).
2. Lefevre H.C. The Fiber-Optic Gyroscope // Artech House, London, 1992. – 314 p.
3. Lefevre H.C. The Fiber-Optic Gyroscope: Achievement And Perspective // Proceedings of 19th Saint Petersburg International Conference on Integrated Navigation Systems. – 2012. – P. 122–126.
4. Lefevre H.C. Ultimate-performance Fiber-optic Gyroscope: A Reality // 16th OptoElectronics and Communications Conference, Kaohsiung, Taiwan. – 2011. – P. 75–78.
5. Shupe D.M. Thermally induced nonreciprocity in the fiber-optic interferometer // Applied optics. – 1980. – V. 19. – P. 654–655.
6. Голиков А.В. Температурные погрешности волоконно-оптических гироскопов: Дис. канд. техн. наук. – Саратов, 2001. – 197 с.
7. Вахрамеев Е.И., Галягин К.С., Киселев Е.В., Ошивалов М.А., Ульрих Т.А. Тепловой дрейф волоконно-оптического гироскопа // Изв. вузов. Приборостроение. – 2011. – Т. 54. – № 1. – С. 32–37.
8. Драницына Е.В., Егоров Д.А. Исследование зависимости выходного сигнала волоконно-оптического гироскопа от температуры в составе бескарданного инерциального измерительного модуля // Навигация и управление движением: Материалы докладов XIV конференции молодых ученых «Навигация и управление движением». – СПб: ГНЦ РФ ОАО «Концерн «ЦНИИ «Электроприбор», 2012. – С. 447–452.
9. Драницына Е.В., Егоров Д.А., Унтилов А.А., Дейнека Г.Б., Шарков И.А., Дейнека И.Г. Снижение влияния изменения температуры на выходной сигнал волоконно-оптического гироскопа // Гироскопия и навигация. – СПб, 2012. – № 4 (79). – С. 10–20.
10. Шереметьев А.Г. Волоконный оптический гироскоп. – М.: Радио и связь, 1987. – 152 с.
11. Pepe G.Davis, Bush Jeff. Broadband erbium source for fiber optic sensor applications // Third Pacific Northwest Fiber Optic Sensor Workshop 10, September 2. – 1997. – P. 10–18.

- Шарков Илья Александрович** – Россия, Санкт-Петербург, Санкт-Петербургский национальный исследовательский университет информационных технологий, механики и оптики, научный сотрудник, [ilya.sharkov@gmail.com](mailto:ilya.sharkov@gmail.com)
- Рупасов Андрей Викторович** – Россия, Санкт-Петербург, Санкт-Петербургский национальный исследовательский университет информационных технологий, механики и оптики, аспирант, [sadbender@yandex.ru](mailto:sadbender@yandex.ru)
- Стригалева Владимир Евгеньевич** – Россия, Санкт-Петербург, Санкт-Петербургский национальный исследовательский университет информационных технологий, механики и оптики, кандидат физ.-мат. наук, профессор, [vstrglv@mail.ru](mailto:vstrglv@mail.ru)
- Волковский Сергей Александрович** – Россия, Санкт-Петербург, Санкт-Петербургский национальный исследовательский университет информационных технологий, механики и оптики, аспирант, [zhivotnoe1941@mail.ru](mailto:zhivotnoe1941@mail.ru)