УДК 630*3 DOI: 10.18324/2077-5415-2019-1-107-111

# Применение метода спектрального анализа картерного масла для определения рациональных режимов пуска и прогрева двигателей лесозаготовительных машин

М.А. Рассохин[a], В.Н. Сащенко[b], А.Г. Пушкарев[c], К.В. Пастухов[d]

Уральский институт государственной противопожарной службы МЧС России, ул. Мира 22, Екатеринбург, Россия
[a]Rassohin.maxim@mail.ru, [b]vovasaschenko@mail.ru, [c]Pushkin1976@bk.ru, [d]kosoi911@mail.ru
[a]https://orcid.org/0000-0002-9800-9374, [b]https://orcid.org/0000-0002-1449-8845,
[c]https://orcid.org/0000-0002-5569-528X, [d]https://orcid.org/0000-0002-7021-3584
Статья поступила 8.02.2019, принята 12.02.2019

*Решение проблемы обеспечения безотказности и долговечности агрегатов технических систем различного назначения, в частности, двигателей лесозаготовительных машин, представляет собой важную теоретическую и практическую задачу, актуальность которой очевидна. Однако в последние несколько десятилетий к этой теме отмечается особый интерес, причем не только со стороны организаций и специалистов, которые занимаются созданием подобных агрегатов и научно-техническим сопровождением их эксплуатации, но и со стороны непосредственно эксплуатирующих организаций. В условиях отрицательных температур окружающего воздуха запуск и последующий прогрев двигателей лесозаготовительных машин сопровождается дефицитом смазки в узлах трения двигателя внутреннего сгорания (ДВС). В результате пуск и последующий прогрев сопровождаются резким повышением износа трибосопряжений. От правильно выбранного режима прогрева во многом зависят надежность и долговечность ДВС. В процессе исследования установлено, что для определения рациональных режимов пуска и прогрева двигателей лесозаготовительных машин целесообразно использовать метод спектрального анализа картерного масла. В статье подробно представлены преимущества спектрального анализа, приведено краткое описание его основных методов. На примере диагностирования узлов трения двигателей лесозаготовительных машин указан порядок проведения спектрального анализа, включающий в себя, в частности, изготовление образцов типовых масел, которые будут сжигаться в специальной установке, особенности построения спектрограмм, методику расчета среднего значения яркости и калибровочных зависимостей. По результатам исследования сделаны выводы о зависимости состояния ДВС от изнашивания пар трения двигателя при отрицательных температурах, особенно в период холодного пуска и прогрева*.

**Ключевые слова:** двигатель; изнашивание; масло; анализ; спектр; пуск.

# Application of the method of spectral analysis of crankcase oil to determine the rational modes of start-up and warm-up of engines of forest machines

M.A. Rassokhin[a], V.N. Saschenko[b], A.G. Pushkarev[c], K.V. Pastukhov[d]

Ural Institute of State Firefighting Service of Ministry of Russian Emergency Situations Ministry; 22, Mira St.,Yekaterinburg, Russia
[a]Rassohin.maxim@mail.ru, [b]vovasaschenko@mail.ru, [c]Pushkin1976@bk.ru, [d]kosoi911@mail.ru
[a]https://orcid.org/0000-0002-9800-9374, [b]https://orcid.org/0000-0002-1449-8845,
[c]https://orcid.org/0000-0002-5569-528X, [d]https://orcid.org/0000-0002-7021-3584
Received 8.02.2019, accepted 11.02.2019

*Solving the problem of ensuring the reliability and durability of aggregates of technical systems for various purposes, in particular, engines of forest machines, is an important theoretical and practical task, the relevance of which is obvious. However, in the last few decades, there has been a special interest in it, not only from the organizations and specialists that are engaged in its creation and scientific and technical support in operation, but also from the direct operating organizations. In conditions of negative ambient temperatures, the start-up and subsequent heating of the engines of logging machines is accompanied by a lack of lubrication in the friction units of the internal combustion engine (ICE). As a result, the start-up and subsequent heating is accompanied by a sharp increase in the wear of tribo-stresses. The reliability and durability of the internal combustion engine largely depends on the correctly selected heating mode. In the process of research, it was established that to determine the rational modes of starting and warming up the engines of logging machines it is advisable to use the method of spectral analysis of crankcase oil. The article details the advantages of spectral analysis, provides a brief description of its main methods. By the example of diagnosing friction units of logging machines, the order of spectral analysis is given, including, in particular, the production of standard oil samples that will be burned in a special installation,*

*the spectrogram construction features, the method for calculating the average brightness and calibration dependencies. According to the results of the study, conclusions were drawn about the dependence of the state of internal combustion engines on wear of engine friction pairs at negative temperatures, especially during the cold start and warm-up period.*

**Keywords:** engine; wear; oil; analysis; spectrum; start.

**Введение**

Транспорт играет значительную роль в эксплуатации, разработке и возобновлении лесных массивов, следовательно, в себестоимости продукции лесопромышленного комплекса большую долю составляют транспортные расходы. Одной из актуальных задач является снижение данных расходов [1].

Расходы на эксплуатацию лесозаготовительных машин в холодное время года ощутимо повышаются из-за увеличения времени прогрева двигателей, повышения износа трибосопряжений двигателей внутреннего сгорания (ДВС) [2]. Можно оптимизировать расходы на подготовку лесозаготовительной техники к работе, а также уменьшить износы, возникающие при пуске и прогреве двигателей в условиях отрицательных температур, определив наиболее рациональный режим пуска и последующего прогрева [3].

Исходя из вышесказанного, можно сделать вывод, что исследования, направленные на обеспечение приспособленности двигателей лесотранспортных машин к режиму пуска и последующего прогрева в условиях низких температур по параметрам смазочных процессов в деталях ДВС, способствуют снижению эксплуатационных затрат и повышению долговечности двигателя, следовательно, являются актуальными.

В работах [4–7] показано, что одними из наиболее перспективных методов оценки технического состояния систем объектов машиностроения являются методы, основанные на принятии решения по результатам анализа вторичных признаков. При этом основной проблемой здесь является выбор наиболее информативных из них. Решению этой проблемы посвящены работы [8; 9], в которых рассматриваются вопросы применения метода эмиссионного спектрального анализа масла как одного из наиболее полно удовлетворяющих требования к методам экспресс-анализа технического состояния нагруженных систем и узлов машин, что подтверждается работами [10–12].

В настоящее время существует большое количество установок для спектрального анализа нефти и нефтепродуктов как российского, так и зарубежного производства. Отличаясь высокой информативностью и универсальностью, метод спектрального анализа с характерным спектром, который можно наблюдать при сжигании пробы масла в зоне электрического разряда, позволяет оценивать содержание в масле элементов износа, посторонних примесей, присадок. Спектры регистрируются фотографированием или с помощью фотоэлементов [13; 14].

**Методика исследования.** Для диагностирования двигателей применяют прямые методы спектрального анализа. Наибольшее распространение получил метод вращающегося электрода. В этом методе верхним электродом служит графитовый стержень, а нижним — графитовый диск, который при вращении захватывает масло со спектральной емкости и подает его в зону электрического разряда [15].

Подобный метод применяется для исследования коробок передач и главных передач двигателей лесозаготовительных машин. Основными элементами, подлежащими контролю, являются железо (Fe) — основной элемент конструкционных материалов большинства составляющих коробок передач, медь (Cu) — основной элемент медных синхронизаторов и втулок, хром (Cr) и марганец (Mn) — основные легирующие элементы, входящие в состав конструкционных материалов коробок передач и главных передач, кремний (Si) — содержится в составе грязи и пыли и характеризует влияние условий эксплуатации [16; 17]. Причем возможно диагностирование по совокупности массовых износов, а также проведение более глубокого анализа, результатом которого будет получение информации об износах конкретных деталей и механизмов двигателя.

Процесс спектрального анализа происходит следующим способом. Для каждого из перечисленных элементов (Fe, Cu, Cr, Mn, Si) изготавливаются образцы типовых масел с концентрацией от 3 до 1 000 г/т, которые сжигаются в специальной установке. Результаты, после обработки анализатором, выводятся в виде спектрограмм, представляющих собой зависимости яркостей от длины волны $L(\lambda)$ и соответствующие элементу, который анализируется [18; 20; 21].

Проведя сравнение доступных нам методов спектрального анализа, для исследования пускового изнашивания ДВС выбираем стандартный метод многоэлементного анализа использованных и неиспользованных смазочных масел и базовых масел методом атомно-эмиссионной спектрометрии с индуктивно связанной плазмой (СТ РК ASTM D 5185-2013).

Особенность данного метода заключается в том, что он позволяет производить как качественный, так и количественный анализ. Источником атомизации и возбуждения служит индуктивно связанная плазма.

Метод оптической атомно-эмиссионной спектрометрии с индуктивно связанной плазмой (ИСП – АЭС), позволяет проводить многоэлементный анализ органических растворителей и, по мнению многих исследователей [8; 11; 19; 22–25], является наиболее рациональным выбором для проведения анализа моторных масел. Анализ проводится по содержанию в пробе масла индикаторов износа, также возможно определение закономерности изменения элементного состава масла. В табл. 1 приведен список индикаторов износа, а также возможных источников их происхождения.

Кроме индикаторов износа приведенных выше, в таблице 2, отражены функциональные особенности некоторых присадок, массовую долю которых также можно определить методом атомно-эмиссионной спектрометрии с индуктивно связанной плазмой.

*Таблица 1*

*Индикаторы износа и их возможные источники*

| Индикаторы | Возможные источники происхождения |
|---|---|
| Al | Блок цилиндров, поршни, компрессор, втулки масляного насоса, подшипники, масляный радиатор |
| B | Утечки системы охлаждения, примеси в смазке |
| C | Примеси в смазке |
| C | Цилиндры, поршневые кольца |
| Cu | Подшипники, сердечник масляного радиатора |
| Fe | Цилиндры, поршневые кольца, привод клапанов, блок цилиндров, масляный насос, подшипники, шестерни |
| Pb | Подшипники, примеси в топливе |
| Si | Блок цилиндров, пыль на уплотнениях |
| Sn | Подшипники, поршни, элементы масляного радиатора, шатуны |

*Таблица 2*

*Функциональные особенности присадок, содержащихся в пробах моторного масла*

| Присадки | Полезные качества |
|---|---|
| B | Ингибитор коррозии, противоизносное, антиоксидантное |
| Ba | Ингибитор коррозии, моющее, ингибитор ржавчины |
| Mg/Ca | Моющая присадка / диспергент |
| Mn | Улучшение сгорания, дымоподавитель |
| P | Противоизносное, ингибитор коррозии, антиоксидант |
| S | Мультифункциональный компонент |
| Si | Пеногаситель |
| Zn | Противоизносное, ингибитор коррозии, антиоксидантное |

На рис. 1 приведена зависимость для случая введения в свежее картерное масло кремния в различных концентрациях.

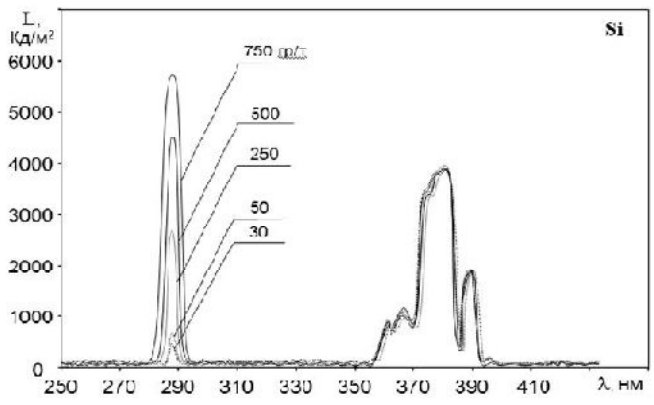


**Рис. 1.** Результаты сжигания масла с содержанием кремния от 30 до 750 г/т [19]

Первый пик λ = 288 нм определяет свечение примесей кремния в разной концентрации, другой пик, который соответствует диапазону λ = 355 ... 395 нм, определяет диапазон длин волн свечения присадок и сохраняется для всех случаев испытаний масла.

Далее данные спектрограмм используются для расчета калибровочных зависимостей, которые определяют связь яркости свечения элементов от их концентрации, т. е. функцию *L(n)*. При построении спектрограмм каждое масло должно пропаливаться не менее 10 раз. По результатам сжигания определяется среднее значение яркости *L* (Кд/м$^2$):

$$\overline{L} = \frac{1}{m}\sum_{i=1}^{m} L_i,$$

где *m* — общее количество выполненных испытаний масла (m ≥ 10); $L_i$ — полученные значения яркости свечения, зафиксированные для конкретного включения в *i*-м испытании, и контролируемое значение стандартного отклонения среднего $\sigma_L$(Кд/м$^2$) [20]:

$$\sigma_{\overline{L}} = \sqrt{\frac{\sum_{i=1}^{m}\left(L_i - \overline{L}\right)^2}{m\,(m-1)}}\ .$$

На следующем этапе осуществляется непосредственно построение соответствующих калибровочных зависимостей.

Как свидетельствуют практические эксперименты, основные элементы, характеризующие процесс постепенного изнашивания деталей, это медь Cu и железо Fe. Хром и марганец являются легирующими элементами стальных деталей и могут выступать маркерами процессов износа зубчатых муфт, колец и тел качания подшипников [18; 20; 21].

Применяя метод спектрального анализа, можно анализировать количество и концентрацию индикаторов износа в моторном масле и делать выводы о техническом состоянии ДВС, а также контролировать величину износа деталей двигателя.

**Выводы**

Подводя итог, можно отметить, что техническое состояние ДВС лесозаготовительных машин во многом зависит от изнашивания пар трения двигателя. Процесс изнашивания увеличивается при отрицательных температурах, особенно в период холодного пуска и прогрева. Одним из путей решения данной проблемы является выбор оптимального режима работы двигателя, в том числе рационального режима его пуска и прогрева в условиях низких температур. Для определения рациональных режимов пуска и прогрева наиболее эффективно использовать метод спектрального анализа, позволяющий определять интенсивность изнашивания деталей двигателя по концентрации индикаторов износа в моторном масле. Выбрав рациональный режим пуска и прогрева, можно снизить потери в узлах трения и тем самым увеличить долговечность пар трения и

двигателя в целом, что обеспечит снижение затрат на техническое обслуживание и ремонт, а также на потери при простоях автомобиля. Снижение затрат на техническое обслуживание и ремонт, уменьшение потерь при простое, в свою очередь, позволят уменьшить эксплуатационные расходы.

*Литература*


1. Овчаренко С.М., Минаков В.А. Оценка технического состояния деталей дизеля с применением нейронно-сетевой обработки данных // Контроль. Диагностика. 2016. № 2. С. 46-50.

2. Охотников Б.Л., Бердышев И.В. Проблемы, связанные с эксплуатацией ДВС при низкой температуре окружающего воздуха, и пути их преодоления // Автотранспортное предприятие. 2011. № 4. С. 46-48

3. Федюнин П.И., Матяш С., Байкалов К.В., Речкин С., Вальков В.А. Проблемы тепловой подготовки автотракторных двигателей в условиях отрицательных температур // Сибирский вестник сельскохозяйственной науки. 2007. № 8 (176). С. 95-101.

4. Yasin Mohd Hafizil Mat. Study of Diesel-biodiesel Fuel Properties and Wavelet Analysis on Cyclic Variations in a Diesel Engine// Energy procedia. 2017. Vol. 110. P. 498-503.

5. Козлов В.К., Гарифуллин М.Ш. Контроль состояния трансформаторных масел по их оптическим спектрам // Новое в российской электроэнергетике. 2017. № 1. С. 16-22.

6. Zhan Honglei. The spectral analysis of fuel oils using terahertz radiation and chemometric methods // Journal of physics. 2016. № 39. P. 42- 57.

7. Ревякин М.М. Реализация назначенного ресурса двигателя путем контроля условий эксплуатации по параметру удельного химмотологического показателя моторного масла // Агротехника и энергообеспечение. 2017. № 2 (15). С. 62-67.

8. Прахов И.В., Фарваев И.Р. Электромагнитный спектральный метод оценки технического состояния и ресурса машинных агрегатов с электрическим приводом // Главный энергетик. 2016. № 10. С. 13-18.

9. Hao Y. Guang Construction and Simplification of the Calibration Model for Spectral Analysis of Fuel Oil Properties Based on Mutual Information Method // Journal of physics. 2012. № 1. P. 175-178.

10. Маркова Л.В. Интеллектуальный метод оценки состояния смазочного масла // Трение и износ. 2016. Т. 37. № 4. С. 401-409.

11. Владимиров Д.И., Никоноров А.Н. Диагностирование дизелей по соотношению концентраций продуктов изнашивания в работавшем моторном масле // Евразийский научный журнал. 2016. №10. С. 294-296.

12. Liu Yong Failure Prediction of Power-Shift Steering Transmission Based on Oil Spectral Analysis // Diagnosis mechanism. 2015. P. 2620-2624.

13. Ганеев А.А. Исследование условий формирования спектрально-абсорбционных многомерных образов моторных топлив и жидких минеральных технических масел // Журнал аналитической химии. 2016. № 12. С. 1263-1267.

14. Das R.K. Fuel characterization and performance parameters analysis of dieselengine using blends of palm biodiesel and tyre pyrolysis oil // Journal- brazilian society of mechanical sciences and engineering. 2017. № 5. P. 1491-1497.

15. Дроков В.Г. Оценка технического состояния маслосистемы авиационных газотурбинных двигателей с помощью трибодиагностических методов // Заводская лаборатория. Диагностика материалов. 2018. № 1-1. С. 36-46.

16. Nathalie. Near-Infrared Spectroscopy Analysis of Heavy Fuel Oils Using a New Diffusing // Applied spectroscopy. 2015. Is.10. P. 1137-1143.

17. Скрипка А.В. Диагностирование дизелей пожарной техники по соотношению концентраций продуктов изнашивания в моторном масле // Вестн. Воронеж. ин-та ГПС МЧС России. 2017. № 4. С. 56-59.

18. Дунаев А.В. Масла как средство диагностирования машин и оборудования // Тракторы и сельхозмашины. 2015. № 6. С. 33-37.

19. Глущенко А.А. Диагностирование двигателя по содержанию продуктов износа в картерном масле // Изв. С.-Петерб. гос. аг. ун-та. 2015. № 41. С. 241-244.

20. Перевалов А.С., Рассохин М.А., Жилин М.А., Сащенко В.Н. Повышение готовности пожарных автомобилей за счет внедрения методов диагностирования двигателей по анализу параметров картерного масла // Техносферная безопасность. 2015. № 4 (9). С. 50-54.

21. Weinreb K. Diagnostics of an induction-motor rotor by the spectral analysis of stator currents // Thermal engineering. 2013. № 14. P. 1006-1023.

22. Kim S.D., Lim J.M., Lee W., Kim Y.S., Nam S.H., Lee Y.I. Analytical Evalu-ation of electrothermal vaporization / low-pressure inductively coupled plasma atomic emission spectrometry for trace elemental analysis in microliter sam-ples // Microchemical Journal. 2004. Vol. 78. P. 127-134.

23. Matusiewicz H., Barnes R. Evaluation of a controlled-temperature furnace at-omizer as a sampling device for inductively coupled plasma-atomic emission spectrometry // Spectrochim. Acta. B. 1985. Vol. 40., №. 1-2. P. 29-39.

24. Berryman N.G., Probst T.U. Parameter optimization of electrothermal va-porization inductively coupled plasma mass spectrometry for oligoelement determination in standard reference materials // Fresen. J. Anal. Chem. 1996. Vol. 355. P. 783-788.

25. Verrept P., Dams R., Kurfiirst U. Electrothermal vaporization inductively coupled plasma atomic emission spectrometry for the analysis of solid sam-ples: contribution to instrumentation and methodology // Fresen. J. Anal. Chem. 1993. Vol. 346. P 1035-1041.


*References*


1. Ovcharenko S.M., Minakov V.A. Evaluation of the technical condition of diesel engine parts using neural-network data processing // Controller. Diagnostics. 2016. №2. P. 46-50.

2. Okhotnikov B. L., Berdyshev I. V. Problems associated with the operation of the internal combustion engine at low ambient temperatures, and ways of their overcoming // the Motor transportation enterprise. 2011. № 4. P. 46-48.

3. Fedyunin P.I., Matyash S.P., Baikalov K.V., Rechkin S.V., Valkov V.A. Problems of thermal preparation of automotive engines under low temperature conditions // Siberian bulletin of agricultural science. 2007. № 8 (176). P. 95-101.

4. Yasin, Mohd Hafizil Mat et al. Study of Diesel-biodiesel Fuel Properties and Wavelet Analysis on Cyclic Variations in a Diesel Engine// Energy procedia. 2017. Vol. 110. P. 498-503.

5. Kozlov V.K., Garifullin M.Sh. Monitoring the state of transformer oils by their optical spectra // New in the Russian power industry. 2017. № 1. P. 16-22.

6. Zhan, Honglei et al. The spectral analysis of fuel oils using terahertz radiation and chemometric methods // Journal of physics. 2016. № 39. P. 42- 57.

7. Revyakin M.M. Realization of the engine's designated resource by controlling the operating conditions by the parameter of the specific chemotologic indicator of engine oil // Agrotechnika and energy supply. 2017. № 2. P. 62-67.

8. Prakhov I.V., Farvayev I.R. Electromagnetic spectral method of assessing the technical condition and resource of machine units with electric drive // Glavny energetik. 2016. № 10. P. 13-18.

9. Hao, Y. Guang Construction and Simplification of the Calibration Model for Spectral Analysis of Fuel Oil Properties Based on Mutual Information Method // Journal of physics. 2012. № 1. P. 175-178.

10. Markova L.V. Intellectual method of assessing the state of lubricating oil // Friction and wear. 2016. T. 37. № 4. P. 401-409.

11. Vladimirov D.I., Nikonorov A.N. Diagnosis of diesel engines by the ratio of concentrations of wear products in the working engine oil // Eurasian Scientific Journal. 2016. № 10. P. 294-296.

12. Liu, Yong Failure Prediction of Power-Shift Steering Transmission Based on Oil Spectral Analysis // Diagnosis mechanism. 2015. P. 2620-2624.

13. Ganeev A.A. Study of the conditions for the formation of spectral-absorptive multi-dimensional images of motor fuels and liquid mineral technical oils // Journal of Analytical Chemistry. 2016. № 12. P. 1263-1267.

14. Das, R.K. Fuel characterization of parameters of dieselengine using biodiesel and tire pyrolysis oil // Journal. 2017. № 5. R. 1491-1497.

15. Drokov V.G. Evaluation of the technical condition of the oil system of aircraft gas turbine engines using tribological methods // Factory Laboratory. Diagnostics of materials. 2018. № 1-1. P. 36-46.

16. Nathalie et al. Near-Infrared Spectroscopy Analysis of Heavy Duty Oils using a New Diffusing // Applied spectroscopy. 2015. Issue 10. R. 1137-1143.

17. Violin A.V. Diagnostics of diesel engines of fire-fighting equipment according to the ratio of concentrations of wear products in engine oil // Bulletin of the Voronezh Institute of the State Fire Service of the Emercom of Russia. 2017. № 4. P. 56-59.

18. Dunaev A.V. Oils as a means of diagnosing machines and equipment // Tractors and agricultural machines. 2015. № 6. P. 33-37.

19. Glushchenko A.A. Diagnosing the engine on the content of wear products in crankcase oil // News of St. Petersburg State Agrarian University. 2015. № 41. P. 241-244.

20. Perevalov A.S., Rassokhin M.A., Zhilin M.A., Saschenko V.N. Improving the readiness of fire trucks through the introduction of methods for diagnosing engines to analyze the parameters of crankcase oil // Technosphere safety. 2015. № 4 (9). P. 50-54.

21. Weinreb, K. Diagnostics of an induction-motor rotor currents // Thermal engineering. 2013. № 14. P. 1006-1023.

22. Kim S.D., Lim J.M., Lee W. Kim Y.S., Nam S.H., Lee Y.I. Analytical Evalu-ation of electrothermal vaporization / low-pressure inductively coupled plasma atomic emission spectrometry for trace elemental analysis in microliter sam-ples // Microchemical Journal. 2004. V. 78. P. 127 – 134.

23. Matusiewicz H., Barnes R. Evaluation of a controlled-temperature furnace at-omizer as a sampling device for inductively coupled plasma-atomic emission spectrometry // Spectrochim. Acta. B. 1985. V. 40. №. 1-2. P. 29 – 39.

24. Berryman N. G., Probst T. U. Parameter optimization of electrothermal va-porization inductively coupled plasma mass spectrometry for oligoelement determination in standard reference materials // Fresen. J. Anal. Chem. 1996. V. 355. P. 783 – 788.

Verrept P., Dams R., Kurfiirst U. Electrothermal vaporization inductively coupled plasma atomic emission spectrometry for the analysis of solid sam-ples: contribution to instrumentation and methodology // Fresen. J. Anal. Chem. 1993. V. 346. P. 1035-1041.