

УДК 504.06+574+663.1

**ОПТИЧЕСКИЕ МНОГОУРОВНЕВЫЕ МУЛЬТИСЕНСОРНЫЕ СИСТЕМЫ
ЭКОЛОГИЧЕСКОГО МОНИТОРИНГА НЕФТЕЗАГРЯЗНЕННЫХ УЧАСТКОВ**

© 2023 В.В. Ермаков

Самарский федеральный исследовательский центр РАН, Институт экологии Волжского бассейна РАН,
г. Тольятти, Россия

Статья поступила в редакцию 01.12.2023

В работе рассматриваются особенности разработки оптической многоуровневой мультисенсорной системы экологического мониторинга нефтезагрязненных участков. В состав системы входит набор сенсоров различного вида, которые разнесены в пространстве с установкой на космические и летательные аппараты, подвижные и носимые наземные аналитические системы. Единая природа аналитического сигнала сенсоров позволяет проводить обработку полученной информации как общего массива, что увеличивает возможности таких систем и делает их пригодными одновременно для глобального поиска загрязнений и для определения свойств загрязнённой поверхности.

Ключевые слова: экологический мониторинг, нефтезагрязненные участки, оптическая сенсорная система, мультисенсорный мониторинг, дистанционное зондирование земли, обработка изображений, спектроскопия

DOI: 10.37313/1990-5378-2023-25-6-203-207

EDN: CMRJRN

Работа выполнена в рамках государственного задания учреждениям науки, номер 1021060107178-2-1.5.8.

Предприятия химического и нефтегазового комплекса традиционно считаются одними из наиболее активных загрязнителей окружающей среды [2-8, 10-12, 14, 15]. На их деятельность приходится порядка 18% от всех промышленных загрязнений [13]. Основной целью экологического мониторинга в зонах расположения источников антропогенного воздействия, в том числе нефтезагрязненных участков, является наблюдение за состоянием окружающей среды с оценкой уровня этого воздействия, а на основе этого прогноз изменений состояния окружающей среды, что необходимо для предотвращения или уменьшения неблагоприятных последствий изменения состояния окружающей среды.

Построение такой системы основывается на базовых принципах экологического контроля: иерархичность построения системы мониторинга; комплексность диагностирования состояния; непрерывность и оперативность мониторинга; высокое пространственно-временное разрешение дистанционного зондирования Земли; достоверность и сопоставимость измерений, оценки и прогноза; использование общепринятых стандартов сбора и обработки информации, построения баз знаний и информационных систем для целей оперативного обмена данными и использование методов

*Ермаков Василий Васильевич, кандидат технических наук, старший научный сотрудник лаборатории инженерной экологии и экологического мониторинга.
E-mail: wassiliy@rambler.ru*

математического моделирования для текущей оценки, и прогнозирования.

Достижение поставленных целей при соблюдении указанных принципов предполагает применение наиболее современных методов получения информации различного формата, включая лабораторные исследования и дистанционный мониторинг.

Оптическая мультисенсорная система – это аналитическое устройство, включающее набор из двух и более оптических сенсоров (сенсорных каналов), оптимизированных под определённое приложение [1]. Размещение отдельных элементов такой системы в пространстве для выполнения задачи мониторинга позволяют сформировать оптическую многоуровневую мультисенсорную систему экологического мониторинга. Многоуровневая мультисенсорная система мониторинга объектов техногенной нагрузки понимается как совокупность методов и технических решений, позволяющих оперативно и достоверно проводить оценку состояния и свойств объектов размещения отходов и загрязнённых территорий с применением набора сходственных по физической основе получения аналитического сигнала сенсоров расположенных на различном удалении от исследуемого объекта в совокупности с референтным лабораторным анализом и технологиями совместной обработки данных.

Оптические методы для дистанционного и контактного зондирования являются одним из

ведущих направлений в развитии современного экологического мониторинга. При этом имеется возможность использования аналитического сигнала одной природы на различных пространственных уровнях. Оптический анализ окружающей среды обладает преимуществами, включая адаптируемость к различным объектам и средам, возможность работы без пробоподготовки в полевых условиях.

Системы дистанционного зондирования земли (ДЗЗ) из космоса и при авиационной съёмке имеют в своей основе оптические каналы. Их применение решает глобальные и региональные задачи мониторинга крупных объектов. Системы мониторинга включают мульти- и гиперспектральные камеры, позволяющие при анализе данных съёмки делать выводы о свойствах поверхности. В применении к техногенно деградированным территориям данные системы не достаточны. Они дают обобщённые сведения, пригодные только для поиска загрязнённых участков. Это связано с низким пространственным и спектральным разрешением аппаратуры, наложением спектральных характеристик материалов и другими факторами.

Активное развитие получают методы быстрого лабораторного и полевого анализа. Внедряются методы контактного (или близкого) спектрального зондирования. Имеется возможность почать больше информации о свойствах исследуемых объектов, чем при ДЗЗ, но площади на которых проводятся работы существенно ниже.

В настоящее время отсутствует система, позволяющая получать, обрабатывать и использовать данные дистанционного зондирования совместно с данными полевых и лабораторных исследований.

В такой системе информация о состоянии конкретной точки поверхности может быть представлена в виде набора полученных на раз-

ных пространственных уровнях спектральных кривых (или отдельных полос) с разным пространственным, спектральным и радиометрическим разрешением. Вся информация может быть собрана в единый массив данных для обработки универсальными техниками и максимально точного описания состояния области интереса. Организация системы оперативного экологического мониторинга нарушенных территорий требует разработки научных основ сбора и комплексирования данных сенсоров различных уровней мониторинга, оценки состояния и степени воздействия на окружающую среду.

Сенсоры систем ДЗЗ включают системы панхроматической съёмки с высоким пространственным разрешением, мультиспектральные каналы среднего разрешения и гиперспектральные камеры с низким пространственным разрешением. Повышение информативности такой съёмки проводится двумя способами. Во-первых, это повышение пространственного разрешения мульти- и гиперспектральных снимков путём совмещения их с панхроматическим изображением (паншарпенинг). Иным вариантом является использование изображений различных космических аппаратов, которые проводят съёмку одной местности, в качестве независимых спектральных каналов. Так совмещение снимков спутников Landsat и Sentinel 2a, даже при частичном совпадении полос, позволяет использовать одновременно не менее независимых 16 каналов (рис.1). Последовательно проводящие съёмку одной местности аппараты представляют собой мультисенсорную систему космического уровня.

Авиационное (АВИС) зондирование не требует выбора полос прозрачности атмосферы и позволяет гораздо эффективнее использовать гиперспектральные камеры. При этом авиаци-

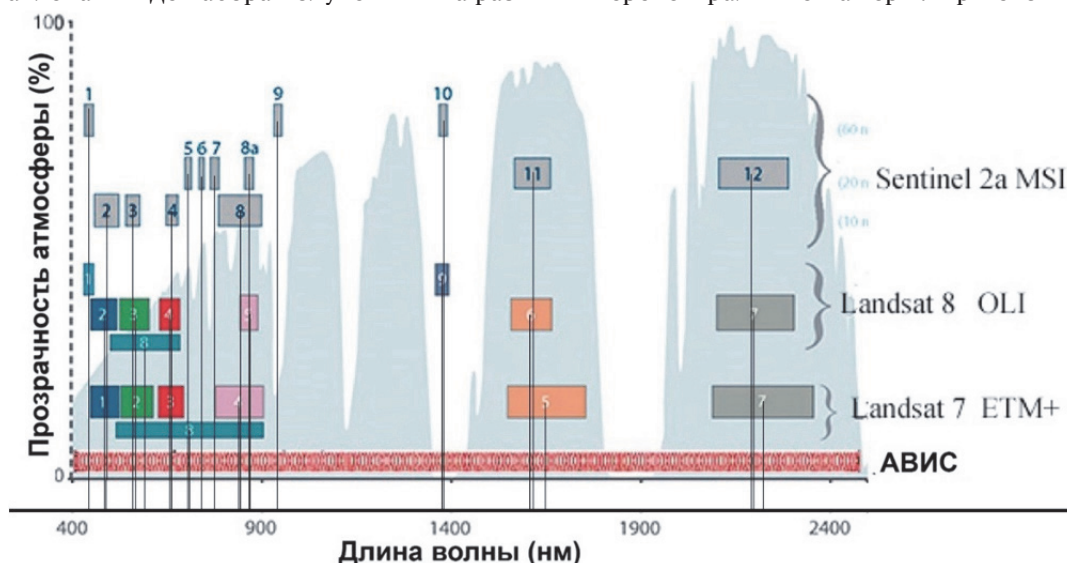


Рисунок 1 – Совмещение спектральных полос космических аппаратов и авиационного спектрометра

онный уровень позволяет производить съёмку с пространственным разрешением менее 1 метра на точку. Спектры содержат более 100 отдельных полос.

В массив данных ДЗЗ могут добавляться в качестве дополнительного источника информации результаты расчётов спектральных индексов различного вида (по аналогии с вегетационными индексами при ДЗЗ) как виртуальные спектральные полосы. С учётом всех возможных сочетаний число информативных индексов может превосходить число спектральных полос.

Для реализации контактного мониторинга на объектах с присутствием загрязнения необходимо решение наиболее важных проблем - повышение оперативности получения результата и получение сведений о состоянии центральной части накопителя без использования плавательных средств для отбора. Решением этих вопросов является разработка и применение полевых анализаторов состава.

Предложено в целях обследования нефтезагрязнённых участков при контактном зондировании использовать ИК-Фурье спектрометр с зондом нарушенного полного внутреннего отражения (НПВО) для одновременного определения содержания влаги и углеводов в грунтах. Преимуществом такой конструкции является то, что измерения проводятся непосредственно в материале с погружением на всю длину зонда, а не только на поверхности.

Анализатор состоит из ИК Фурье-спектрометра «AVATAR 360 FT-IR» соединённого с волоконно-оптическим зондом производства «artphotonicsGmbH» (Германия, г. Берлин) с кристаллом из диоксида циркония. С его помощью возможно определение содержания углеводов нефти и воды от 0,1 до 20% масс. в почвогрунтах различного состава [3]

Основываясь на многомерной калибровочной модели, разработанной для этого анализатора была предложена упрощённая версия оптического мультисенсорного анализатора. Были использованы три наиболее значимые спектральные полосы, а схема анализатора выстроена на основе пар ИК фотодиодов и светодиодов производства компании Иоффе-LED (Санкт-Петербург). Для учёта поглощающей способности на выбранных полосах были выбраны следующие пары LED30-PD29, LED34-PD34, LED55-PD65. Полосы, на которых работают данные диодные пары и их пересечение с полосами спектра загрязнённых грунтов представлены на рис. 2.

Полосы работы индивидуальных сенсоров являются разрешёнными. Расчёт концентрации нефтепродуктов в таком случае происходит с использованием набора одномерных калибровок исходя из формулы:

$$C_{CH} = H * I * (A * E_{(2900)} - B * E_{(3400)} - C * E_{(1600)}),$$

где А, В, С - одномерные калибровочные коэффициенты содержания компонентов при использовании спектрометрии на конкретной длине волны;

Е – энергия отражения на длине волны;

Н – поправочный коэффициент на высоту измерения;

I – поправочный коэффициент на интегральную освещённость поверхности.

Точность данного мультисенсорного анализатора сопоставима с полноспектральным анализатором, при том, что он является более компактным и доступным для размещения на выносных штангах пробоотборников или технике. Анализаторы такого типа являются связующим звеном между спектральным полевым мониторингом и специализированными аналитическими системами.

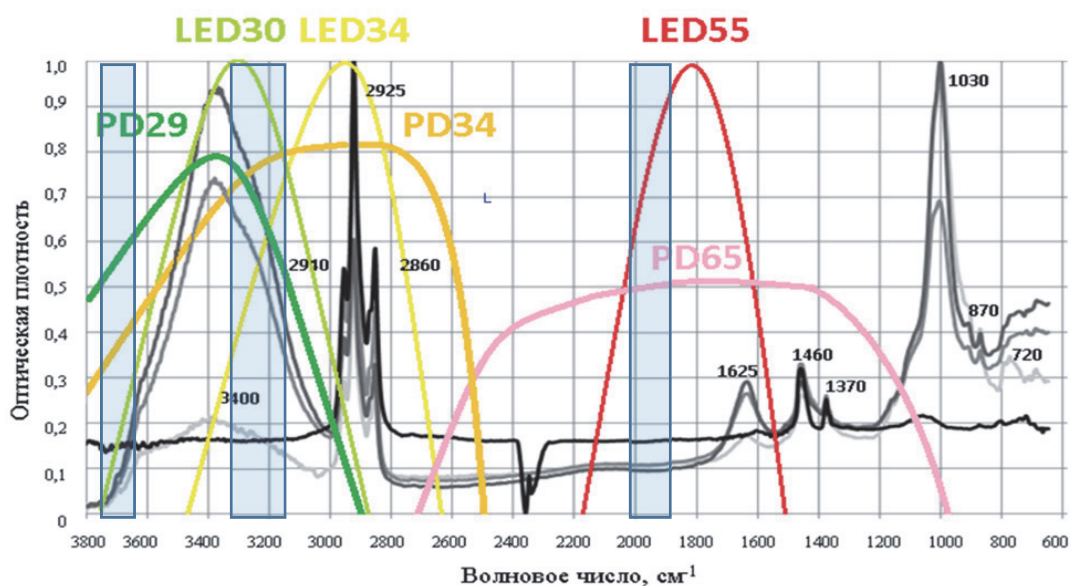


Рисунок 2 – Полосы работы сенсорных пар на фоне спектра загрязнённой почвы

Калибровка анализаторов проводится на основании данных лабораторных исследований с применением аттестованных методик. При этом это единственный тип данных в системах, который изначально не является оптическим сигналом. Предложено использовать результаты натурных и лабораторных измерений состава и состояния обследуемых объектов для построения псевдоизображения и унификации подходов к обработке данных для всех уровней мониторинга. Необходимо провести совмещение разрядности линейного кодирования видеoinформации и результатов лабораторных испытаний. Подготовка данных состоит из процедур центрирования и нормирования результатов лабораторных испытаний и данных оптических сенсоров одновременно и приведение в соответствии с дискретностью разрешения.

Указанный в работе подход позволяет использовать средства обработки изображений и алгоритмы многомерного анализа данных для элементов мультисенсорной системы на всех уровнях мониторинга. Это является логической основой применения оптической многоуровневой мультисенсорной системы для экологического мониторинга. Работа такой системы повышает точность и информативность дистанционных методов мониторинга, расширяет охват и увеличивает скорость полевых исследований и создаёт связь с референтными лабораторными методами.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Богомолов, А.Ю. Развитие мультисенсорного подхода в оптическом спектральном анализе: специальность 02.00.02 «Аналитическая химия»: дисс. ... докт. хим. наук / А.Ю. Богомолов. – 2020. – 307 с.
2. Васильев, А.В. Особенности мониторинга негативного воздействия нефтесодержащих отходов на биосферу / А.В. Васильев // Известия Самарского научного центра РАН. – 2022. – Т. 24. – № 2. – С. 113-120.
3. Васильев, А.В. Подходы к разработке методик оценки негативного воздействия нефтесодержащих отходов на человека и биосферу / А.В. Васильев // Известия Самарского научного центра РАН. – 2022. – Т. 24. – № 6. – С. 165-172.
4. Васильев, А.В. Анализ и оценка загрязнения биосферы при воздействии нефтесодержащих отходов: Монография / А.В. Васильев. – Самара: Издательство СамНЦ РАН, 2022. – 106 с.
5. Васильев, А.В. Анализ особенностей и практические результаты экологического мониторинга загрязнения почвы нефтесодержащими отходами / А.В. Васильев, Д.Е. Быков, А.А. Пименов // Известия Самарского научного центра РАН. – 2014. – Т. 16. – № 1(6). – С.1705-1708.
6. Васильев, А.В. Методика экспериментальных исследований нефтесодержащих отходов с повышенной радиоактивностью как объекта экологического риска / А.В. Васильев, В.В. Ермаков, Д.Е. Щербаков // Известия Самарского научного центра РАН. – 2023. – Т. 25. – № 4. – С. 171-178. – DOI: 10.37313/1990-5378-2023-25-4-171-178.
7. Васильев, А.В. Результаты экспериментальных исследований нефтесодержащих отходов с повышенной радиоактивностью как объекта экологического риска / А.В. Васильев, В.В. Ермаков, Д.Е. Щербаков // Известия Самарского научного центра РАН. – 2023. – Т. 25. – № 4. – С. 179-184. – DOI: 10.37313/1990-5378-2023-25-4-179-184.
8. Васильев, А.В. Особенности переработки нефтесодержащих отходов в зависимости от их радиоактивности / А.В. Васильев, В.В. Ермаков, Д.Е. Щербаков // Известия Самарского научного центра РАН. – 2023. – Т. 25. – № 5. – С. 107-113. – DOI: 10.37313/1990-5378-2023-25-5-107-113.
9. Гурьянова, А.О. Определение массовой доли нефтепродуктов в почвогрунте по спектрам нарушенного полного внутреннего отражения / А.О. Гурьянова, В.В. Ермаков, Е.В. Максина, Е.В. Раменская, Т.В. Сахарова, Д.Е. Быков, В.Г. Артюшенко, А.Ю. Богомолов // Экология и промышленность России. – 2013. – № 12. – С. 24-28. DOI: 10.18412/1816-0395-2013-12-24-28.
10. Карташев, А.Г. Влияние нефтезагрязнений на почвенных беспозвоночных животных / А.Г. Карташев, Т.В. Смолина. – Томск: В-Спектр, 2011. – 146 с.
11. Омелянюк, М.В. Очистка нефтепромыслового оборудования от отложений солей с природными радионуклидами / М.В. Омелянюк // Защита окружающей среды в нефтегазовом комплексе. – 2008. – №2. – С. 23-29.
12. Пучков, А.В. Радиоактивность нефтешлама: первые результаты исследований территории большеземельской тундры / А.В. Пучков, Е.Ю. Яковлев, А.С. Дружинина, С.В. Дружинин // Успехи современного естествознания. – 2022. – № 10. – С. 75-80.
13. Hannah Ritchie, Pablo Rosado and Max Roser (2020) - "Emissions by sector" Published online at OurWorldInData.org. Retrieved from: <<https://ourworldindata.org/emissions-by-sector>> [Online Resource]
14. Vasilyev A.V. Classification and reduction of negative impact of waste of oil-gas industry. Proc. of World Heritage and Degradation. Smart Design, Planning and Technologies Le Vie Dei Mercanti. XIV Forum Internazionale di Studi. 2016. Pp. 101-107.
15. Vasilyev A.V. Experience, Results and Problems of Ecological Monitoring of Oil Containing Waste. Proceedings of the 2018 IEEE International Conference "Management of Municipal Waste as an Important Factor of Sustainable Urban Development" (WASTE'2018), October, 4-6, 2018, Saint-Petersburg; edition of Saint-Petersburg State Electrical Technical University "LETI", 2018, pp. 82-85.

OPTIC MULTILEVEL MULTISENSORY SYSTEMS OF ECOLOGICAL MONITORING OF OILY POLLUTED AREAS

© 2023 V.V. Ermakov

Samara Federal Research Center of Russian Academy of Science, Institute of Ecology of Volga Basing RAS,
Togliatti, Russia

In this paper peculiarities of development of optic multilevel multisensory system of ecological monitoring of oily polluted areas have been considered. The system includes a set of sensors of different types which are spaced out with installation on spacecrafts and aircrafts, mobile and wearable ground-based analytical systems. The unified nature of the analytical signal of sensors is allowing us to process the received information as a common array what increases the capabilities of such systems and makes them suitable at the same time for the global search of pollutions and for determination of the properties of the contaminated surfaces.

Key words: ecological monitoring, oily polluted areas, optic sensory system, multisensory monitoring, remote sensing of the earth, image processing, spectroscopy

DOI: 10.37313/1990-5378-2023-25-6-203-207

EDN: CMRJRN

REFERENCES

1. *Bogomolov, A. Yu.* Razvitie mul'tisensornogo podhoda v opticheskom spektral'nom analize: special'nost' 02.00.02 "Analiticheskaya himiya": diss. ... dokt. him. nauk / A.YU. Bogomolov. – 2020. – 307 s.
2. *Vasil'ev, A.V.* Osobennosti monitoringa negativnogo vozdeystviya neftesoderzhashchih othodov na biosferu / A.V. Vasil'ev // *Izvestiya Samarskogo nauchnogo centra RAN.* – 2022. – T. 24. – № 2. – S. 113-120.
3. *Vasil'ev, A.V.* Podhody k razrabotke metodik ocenki negativnogo vozdeystviya neftesoderzhashchih othodov na cheloveka i biosferu / A.V. Vasil'ev // *Izvestiya Samarskogo nauchnogo centra RAN.* – 2022. – T. 24. – № 6. – S. 165-172.
4. *Vasil'ev, A.V.* Analiz i ocenka zagryazneniya biosfery pri vozdeystvii neftesoderzhashchih othodov: Monografiya / A.V. Vasil'ev. – Samara: Izdatel'stvo SamNC RAN, 2022. – 106 s.
5. *Vasil'ev, A.V.* Analiz osobennostej i prakticheskie rezul'taty ekologicheskogo monitoringa zagryazneniya pochvy neftesoderzhashchimi othodami / A.V. Vasil'ev, D.E. Bykov, A.A. Pimenov // *Izvestiya Samarskogo nauchnogo centra RAN.* – 2014. – T. 16. – № 1(6). – S.1705-1708.
6. *Vasil'ev, A.V.* Metodika eksperimental'nyh issledovanij neftesoderzhashchih othodov s povyshennoj radioaktivnost'yu kak ob'ekta ekologicheskogo riska / A.V. Vasil'ev, V.V. Ermakov, D.E. SHCHerbakov // *Izvestiya Samarskogo nauchnogo centra RAN.* – 2023. – T. 25. – № 4. – S. 171-178. – DOI: 10.37313/1990-5378-2023-25-4-171-178.
7. *Vasil'ev, A.V.* Rezul'taty eksperimental'nyh issledovanij neftesoderzhashchih othodov s povyshennoj radioaktivnost'yu kak ob'ekta ekologicheskogo riska / A.V. Vasil'ev, V.V. Ermakov, D.E. SHCHerbakov // *Izvestiya Samarskogo nauchnogo centra RAN.* – 2023. – T. 25. – № 4. – S. 179-184. – DOI: 10.37313/1990-5378-2023-25-4-179-184.
8. *Vasil'ev, A.V.* Osobennosti pererabotki neftesoderzhashchih othodov v zavisimosti ot ih radioaktivnosti / A.V. Vasil'ev, V.V. Ermakov, D.E. Shcherbakov // *Izvestiya Samarskogo nauchnogo centra RAN.* – 2023. – T. 25. – № 5. – S. 107-113. – DOI: 10.37313/1990-5378-2023-25-5-107-113.
9. *Gur'yanova, A.O.* Opredelenie massovoj doli nefteproduktov v pochvogrunte po spektram narushennogo polnogo vnutrennego otrazheniya / A.O. Gur'yanova, V.V. Ermakov, E.V. Maksina, E.V. Ramenskaya, T.V. Saharova, D.E. Bykov, V.G. Artyushenko, A.YU. Bogomolov // *Ekologiya i promyshlennost' Rossii.* – 2013. – № 12. – S. 24-28. DOI: 10.18412/1816-0395-2013-12-24-28.
10. *Kartashev, A.G.* Vliyanie neftezagryaznenij na pochvennyh bespozvonochnyh zhivotnyh / A.G. Kartashev, T.V. Smolina. – Tomsk: V-Spekt, 2011. – 146 s.
11. *Omel'yanyuk, M.V.* Ochistka neftepromyslovogo oborudovaniya ot otlozhenij solej s prirodnyimi radionuklidami / M.V. Omel'yanyuk // *Zashchita okruzhayushchej sredy v neftegazovom komplekse.* – 2008. – №2. – S. 23-29.
12. *Puchkov, A.V.* Radioaktivnost' nefteshlama: pervye rezul'taty issledovanij territorii bol'shezemel'skoj tundry / A.V. Puchkov, E.YU. Yakovlev, A.S. Druzhinina, S.V. Druzhinin // *Uspekhi sovremennogo estestvoznaniya.* – 2022. – № 10. – S. 75-80.
13. *Hannah Ritchie, Pablo Rosado and Max Roser* (2020) - "Emissions by sector" Published online at OurWorldInData.org. Retrieved from: '<https://ourworldindata.org/emissions-by-sector>' [Online Resource]
14. *Vasilyev A.V.* Classification and reduction of negative impact of waste of oil-gas industry. Proc. of World Heritage and Degradation. Smart Design, Planning and Technologies Le Vie Dei Mercanti. XIV Forum Internazionale di Studi. 2016. Pp. 101-107.
15. *Vasilyev A.V.* Experience, Results and Problems of Ecological Monitoring of Oil Containing Waste. Proceedings of the 2018 IEEE International Conference "Management of Municipal Waste as an Important Factor of Sustainable Urban Development" (WASTE'2018), October, 4-6, 2018, Saint-Petersburg; edition of Saint-Petersburg State Electrical Technical University "LETI", 2018, pp. 82-85.

Vasily Ermakov, Candidate of Technical Science, Senior Researcher of the Engineering Ecology and of Ecological Monitoring. E-mail: wassilyi@rambler.ru