

АВТОМАТИЗИРОВАННЫЙ МОНИТОРИНГ ОХРАННЫХ ЗОН МАГИСТРАЛЬНЫХ ТРУБОПРОВОДОВ ДЛЯ ВЫЯВЛЕНИЯ ВМЕШАТЕЛЬСТВА ТРЕТЬИХ ЛИЦ

¹Ихсанова Э.А., ²Айдарбекова Д.Р.

¹Уфимский государственный нефтяной технический университет, 450064, Уфа, Россия

²TotalEnergies SE, 75000, Париж, Франция

e-mail: e.ikh@yandex.ru

В статье рассматриваются современные подходы к выявлению вмешательства третьих лиц в охраняемых зонах магистральных трубопроводов с использованием спутниковых данных дистанционного зондирования Земли и беспилотных летательных аппаратов. Целью исследования является оценка эффективности спутникового мониторинга для обнаружения событий в полосе отвода трубопровода. В качестве методологии использован анализ пилотного проекта спутникового мониторинга, реализованного на трубопроводной системе компании ООО «Сахалинская Энергия». Проведен количественный анализ результатов обнаружения различных типов активности в охранной зоне трубопровода в рамках пилотного мониторинга продолжительностью 12 суток с использованием двух спутниковых съемок. Полученные результаты показали ограниченную эффективность спутниковых методов при выявлении кратковременных событий. В работе также рассматривается применение методов автоматизированного анализа спутниковых данных для формирования заданий на проведение инспекции с использованием БПЛА. На основании проведенного анализа предложен комбинированный подход к мониторингу охраняемых зон трубопроводов, включающий спутниковые данные, БПЛА и автоматизированную поддержку принятия решений.

Ключевые слова: магистральный трубопровод, дистанционное зондирование Земли, спутниковый мониторинг, БПЛА, вмешательство третьих лиц, автоматизация мониторинга.

AUTOMATED MONITORING OF PIPELINE RIGHT-OF-WAY FOR THIRD-PARTY INTERFERENCE DETECTION

¹Ikhsanova E.A., ²Aidarbekova D.R.

¹Ufa State Petroleum Technological University, 450064, Ufa, Russia

²TotalEnergies SE, 75000, Paris, France

This paper presents an approach for detecting third-party interference in pipeline right-of-way using satellite remote sensing data and unmanned aerial vehicles (UAVs). The study evaluates the effectiveness of satellite monitoring based on a pilot project conducted on the pipeline system of Sakhalin Energy LLC. A quantitative assessment of detection performance was performed for different types of right-of-way activities during a 12-day pilot monitoring period based on two satellite acquisitions. The results show limited capability of satellite monitoring for short-duration events. The paper also considers the use of Advanced Process Control techniques for automated analysis of monitoring data and generation of UAV inspection tasks. A combined monitoring approach integrating satellite data, UAV inspection and automated decision support is proposed.

Keywords: pipeline right-of-way, third-party interference, remote sensing, UAV, advanced process control, automated monitoring.

Введение

В современных условиях эксплуатации магистральных трубопроводов вопросы обеспечения их надежности и безопасности являются одними из наиболее приоритетных. Одной из наиболее значимых угроз остается вмешательство третьих лиц, включающее проведение земляных работ, использование тяжелой техники и иные виды активности в пределах охранной зоны трубопровода.

Практика эксплуатации показывает, что подобные воздействия носят локальный и кратковременный характер. В ряде случаев техника может находиться в зоне трубопровода непродолжительное время, после чего покинуть ее. Это существенно усложняет задачу обнаружения подобных воздействий, особенно при использовании методов мониторинга с низкой частотой наблюдений.

Традиционные методы контроля, такие как наземные обходы и вертолетные облеты, позволяют

выявлять нарушения, однако требуют значительных ресурсов и не обеспечивают непрерывного контроля протяженных участков трубопроводов. В связи с этим активно рассматриваются технологии дистанционного зондирования Земли, а также применение беспилотных летательных аппаратов. Эффективность применения БПЛА для мониторинга охраняемых зон трубопроводов подтверждается современными исследованиями [1].

Дополнительным направлением развития является автоматизация обработки данных мониторинга. В этом случае результаты спутникового наблюдения могут автоматически анализироваться с использованием алгоритмов интеллектуального управления и поддержки принятия решений [2], позволяющих выявлять потенциально опасные изменения и формировать задания на проведение дополнительного обследования.

Литературный обзор. Современные

спутниковые системы дистанционного зондирования Земли предоставляют широкие возможности для мониторинга протяженных объектов, включая магистральные трубопроводы [3,4,5]. В частности, используются радиолокационные спутники с синтезированной апертурой, а также оптические спутники высокого разрешения.

Радиолокационные системы обладают важным преимуществом – они способны получать данные независимо от погодных условий и времени суток [6]. Это особенно актуально для регионов с высокой облачностью. Принцип работы радиолокационных спутников основан на анализе отраженного сигнала и сравнении сцены в различные моменты времени [6,7].

В России используется собственная орбитальная группировка спутников дистанционного зондирования Земли, включающая аппараты «Ресурс-П», «Канопус-В», «Метеор-М», «Электро-Л» и «Арктика-М» [8]. Спутники серии «Ресурс-П» предназначены для получения изображений высокого разрешения [9]. Спутники серии «Канопус-В» применяются для мониторинга природных и техногенных чрезвычайных ситуаций [10].

Дополнительным источником данных дистанционного зондирования Земли являются спутниковые системы европейской программы Copernicus, обеспечивающие регулярное получение радиолокационных и оптических данных для мониторинга протяженных объектов [11].

Материалы и методы. Для оценки эффективности спутникового мониторинга был реализован пилотный проект на трубопроводной системе компании ООО «Сахалинская Энергия». В рамках проекта был выбран участок трубопровода протяженностью около 200 км. Мониторинг выполнялся с использованием спутниковых данных с частотой двух съемок в течение 12 дней.

Для проверки эффективности системы были организованы контролируемые события, имитирующие реальные воздействия. На полосу отвода выводилась техника различных типов, включая экскаваторы, грузовые автомобили, легковые автомобили и строительную технику.

Всего в рамках пилотного проекта было зафиксировано 16 событий [12]. Из них 12 событий находились непосредственно в пределах охранной зоны трубопровода, а 4 события – за ее пределами.

Вероятность обнаружения события длительностью T при средней частоте наблюдений λ может быть представлена выражением [13]:

$$P_{det} = 1 - e^{-\lambda T}$$

где:

P_{det} – вероятность обнаружения события;

λ – частота наблюдений;

T – длительность события.

На рисунке 1 представлена зависимость вероятности обнаружения события от его длительности.

Для формализации оценки эффективности спутникового мониторинга введена классификация типовых событий, возникающих в охранной зоне трубопровода. Для каждого типа события определены характер воздействия, типичная длительность и признаки, по которым событие может быть обнаружено средствами дистанционного зондирования Земли. Обнаружение событий осуществляется на основе анализа изменений радиолокационного сигнала и отражательной способности поверхности, фиксируемых при сравнении спутниковых изображений в различные моменты времени. Классификация типовых событий представлена в таблице 1.

Как видно из таблицы 1, возможность обнаружения событий спутниковыми средствами определяется характером воздействия на поверхность и

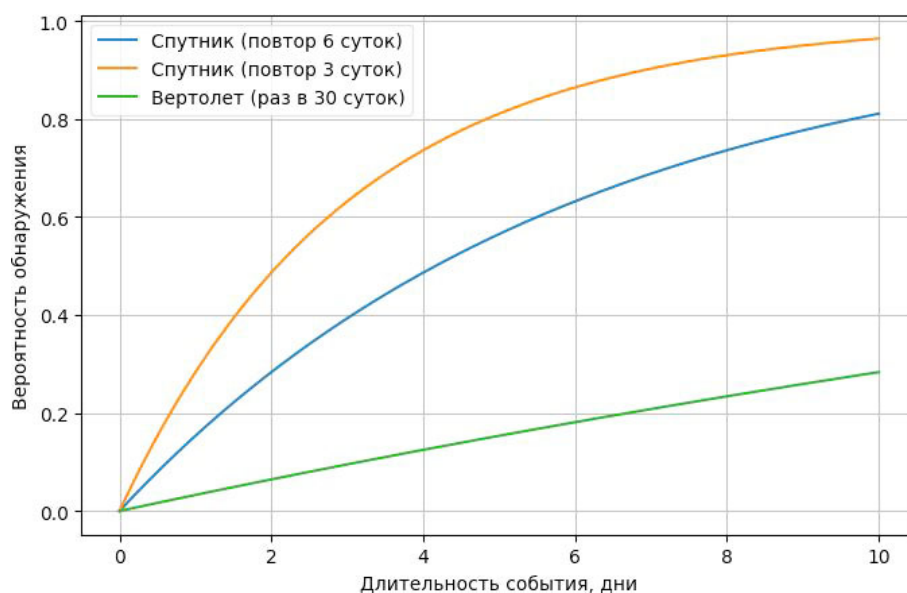


Рис. 1. Зависимость вероятности обнаружения события от длительности события при различной частоте наблюдений

Таблица 1

Классификация типовых событий и признаки обнаружения

Тип события	Характер воздействия	Время воздействия	Признак обнаружения
Земляные работы (экскаватор, кран)	Нарушение рельефа и перемещение грунта	1-5 суток	локальное изменение радиолокационного сигнала и геометрии поверхности
Расчистка растительности	Удаление растительного покрова	2-7 суток	изменение отражательной способности и текстуры поверхности
Работа строительной техники	Уплотнение грунта, следы техники	1–3 суток	появление линейных нарушений поверхности
Стоянка техники	Временное присутствие объекта	несколько часов – 1 сутки	точечное изменение радиолокационного сигнала
Движение автотранспорта	Кратковременное перемещение	минуты – часы	кратковременное изменение сигнала без устойчивого изменения поверхности
Полевые работы (трактор)	Проезд техники без нарушения рельефа	1-2 суток	локальное изменение растительного покрова

Таблица 2

Перечень контролируемых событий пилотного проекта

№	Тип события	Техника	Обнаружено спутником	Комментарий
1	Земляные работы	экскаватор, грузовик	Да	координаты определены неточно
2	Земляные работы	кран, экскаватор, 2 грузовика	Да	обнаружено корректно
3	Стоянка техники	грузовик	Нет	событие вне коридора
4	Земляные работы	кран, экскаватор	Да	повторное обнаружение
5	Движение автотранспорта	автомобили	Нет	изменение растительности
6	Движение автотранспорта	автомобили	Нет	изменений не выявлено
7	Расчистка растительности	мульчер (2 ед.)	Да	сложный рельеф
8	Движение автотранспорта	автомобили	Нет	не обнаружено
9	Работа строительной техники	экскаватор, грузовик	Нет	не обнаружено
10	Расчистка растительности	мульчер	Да	изменение растительности
11	Полевые работы	трактор	Нет	не обнаружено
12	Движение автотранспорта	автомобиль	Нет	не обнаружено
13	Расчистка растительности	мульчер	Да	обнаружено
14	Расчистка растительности	мульчер	Да	повторное событие
15	Расчистка растительности	мульчер + авто	Да	обнаружено
16	Движение автотранспорта	легковые авто	Нет	не обнаружено

длительностью события. Наиболее уверенно будут выявляться события, сопровождающиеся устойчивым изменением рельефа или растительного покрова. Кратковременные события, такие как движение транспорта или стоянка техники, формируют слабые или кратковременные изменения сигнала и об-

наруживаются значительно хуже.

Результаты. Из общего количества 16 событий спутниковой системой были обнаружены около 8 событий. Таким образом, вероятность обнаружения составила около 50% [12].

Анализ показал, что эффективность

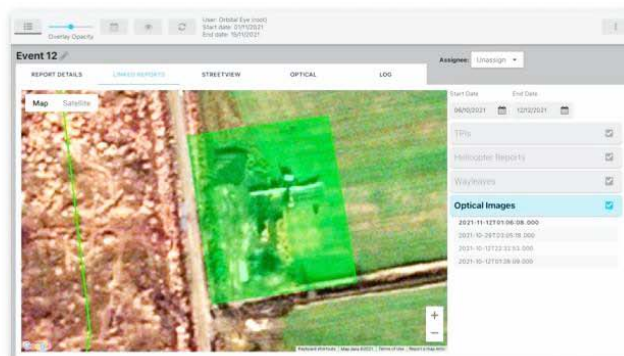
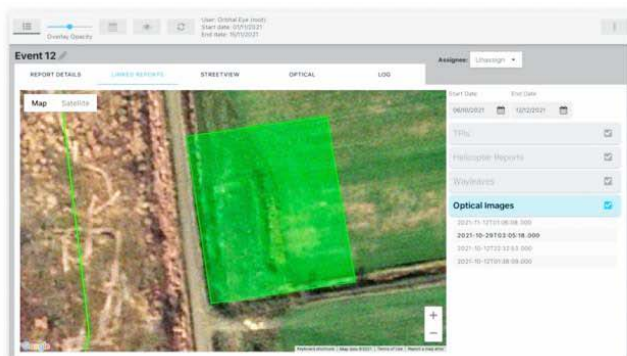


Рис. 2. Пример обнаружения техники в охранной зоне трубопровода

существенно зависит от типа события. Для длительных земляных работ вероятность обнаружения составляла порядка 80-90%. Для активности средней длительности вероятность обнаружения составляла 50-70%. Для кратковременных событий вероятность обнаружения снижалась до 30% и ниже.

Пример обнаруженного транспортного средства представлен на рисунке 2.

Обсуждение. Полученные результаты показывают, что спутниковый мониторинг демонстрирует ограниченную эффективность при выявлении кратковременных воздействий [4,5]. Это связано с низкой частотой повторного наблюдения спутников.

Кратковременные события могут происходить между моментами съемки и не фиксироваться системой.

Беспилотные летательные аппараты обеспечивают более высокую детализацию и могут применяться по требованию. Таким образом спутниковый

мониторинг целесообразно использовать для выявления зон потенциального риска, тогда как БПЛА – для подтверждения событий.

Дополнительно система мониторинга может быть дополнена автоматизированной обработкой данных. В этом случае спутниковые данные анализируются автоматически, после чего формируется задание на запуск БПЛА.

Заключение. Проведенный анализ показал, что эффективность спутникового мониторинга составляет порядка 50-60%. Для кратковременных событий вероятность обнаружения снижается до 30% и ниже.

Использование спутниковых технологий в качестве единственного инструмента мониторинга не обеспечивает требуемого уровня надежности. Наиболее эффективным является комбинированный подход, объединяющий спутниковый мониторинг, БПЛА и автоматизированную обработку данных.

Список литературы

1. Li S., Zhang Y., Wang J. UAV-Based Inspection Technologies for Pipeline Monitoring. *Sensors*. 2021. Vol. 21. No. 14. Pp. 4782-4798.
2. Qin S.J., Badgwell T.A. A Survey of Industrial Model Predictive Control Technology. *Control Engineering Practice*. 2003. Vol. 11. No. 7. Pp. 733-764.
3. Ричардс Дж. Анализ изображений дистанционного зондирования Земли: монография. М.: Техносфера. 2013. 456 с.
4. Mohamadi B., Zhang Y., Prinett V. Monitoring pipeline right-of-way using satellite imagery and change detection techniques. *IEEE Journal of Selected Topics in Applied Earth Observations and Remote Sensing*. 2020. Vol. 13. Pp. 5624-5635.
5. Zhang J., Wang Y., Li X. Detection of third-party interference along pipelines using SAR remote sensing data. *Remote Sensing*. 2021. Vol. 13. No. 15. Pp. 2978-2994.
6. Кёрландер Дж., Макдона Р. Радиолокационные системы с синтезированной апертурой: монография. М.: Радио и связь. 2012. 312 с.
7. Sentinel-1 User Guide [Электронный ресурс]. European Space Agency. Режим доступа: <https://sentinel.esa.int> (дата обращения: 04.04.2026).
8. Действующие космические аппараты дистанционного зондирования Земли [Электронный ресурс] / НЦ ОМЗ Роскосмос. Режим доступа: https://ntsomz.ru/remote_sensing_spacecraft (дата обращения: 04.04.2026).
9. Космический аппарат «Ресурс-П» [Электронный ресурс] / Роскосмос. Режим доступа: <https://www.roscosmos.ru> (дата обращения: 04.04.2026).
10. Космический аппарат «Канопус-В» [Электронный ресурс] / Роскосмос. Режим доступа: <https://www.roscosmos.ru> (дата обращения: 04.04.2026).
11. Copernicus Programme [Электронный ресурс]. Режим доступа: <https://www.copernicus.eu> (дата обращения: 04.04.2026).
12. Материалы пилотного проекта спутникового мониторинга охранной зоны магистральных трубопроводов ООО «Сахалинская Энергия». Южно-Сахалинск. 2021.
13. Росс С. Введение в модели теории вероятностей: учеб. пособие. М.: Мир. 2010. 384 с.

References

1. Li S., Zhang Y., Wang J. UAV-Based Inspection Technologies for Pipeline Monitoring. *Sensors*. 2021. Vol. 21. No. 14. Pp. 4782-4798.
2. Qin S.J., Badgwell T.A. A Survey of Industrial Model Predictive Control Technology. *Control Engineering Practice*. 2003. Vol. 11. No. 7. Pp. 733-764.

3. Richards J.A. *Analiz izobrazheniy dstantsionnogo zondirovaniya Zemli: monografiya* [Remote Sensing Digital Image Analysis]. Moscow: Tekhnosfera Publ. 2013. 456 p.
4. Mohamadi B., Zhang Y., Prinnet V. Monitoring pipeline right-of-way using satellite imagery and change detection techniques. *IEEE Journal of Selected Topics in Applied Earth Observations and Remote Sensing*. 2020. Vol. 13. Pp. 5624-5635.
5. Zhang J., Wang Y., Li X. Detection of third-party interference along pipelines using SAR remote sensing data. *Remote Sensing*. 2021. Vol. 13. No. 15. Pp. 2978-2994.
6. Curlander J.C., McDonough R.N. *Radiolokatsionnyye sistemy s sintezirovannoy aperturoy: monografiya* [Synthetic Aperture Radar: Systems and Signal Processing]. Moscow: Radio i Svyaz Publ. 2012. 312 p.
7. Sentinel-1 User Guide. European Space Agency. Available at: <https://sentinel.esa.int> (accessed: 04.04.2026).
8. Current Earth Remote Sensing Spacecraft. National Center for Earth Observation, Roscosmos. Available at: https://ntsomz.ru/remote_sensing_spacecraft (accessed: 04.04.2026).
9. Resurs-P Spacecraft. Roscosmos. Available at: <https://www.roscosmos.ru> (accessed: 04.04.2026).
10. Kanopus-V Spacecraft. Roscosmos. Available at: <https://www.roscosmos.ru> (accessed: 04.04.2026).
11. Copernicus Programme. Available at: <https://www.copernicus.eu> (accessed: 04.04.2026).
12. Materials of the Pilot Project on Satellite Monitoring of Pipeline Right-of-Way. Sakhalin Energy LLC. Yuzhno-Sakhalinsk. 2021.
13. Ross S. *Vvedeniye v modeli teorii veroyatnostey: ucheb. posobiye* [Introduction to Probability Models]. Moscow: Mir. 2010. 384 p.

Сведения об авторах
Принадлежность к организации

Ихсанова Элина Айдаровна

бакалавр, Уфимский государственный нефтяной технический университет, 450064, Уфа, Россия

Айдарбекова Дилия Робертовна

инженер КиП и АСУТП, ТотальЭнерджис СЕ, 75000, Париж, Франция,

Information about authors
Affiliations

Ikhsanova Elina Aydarovna

Bachelor's student, Ufa State Petroleum Technological University, 450064, Ufa, Russia

Aidarbekova Dilia Robertovna

Instrumentation and Control Systems Engineer, TotalEnergies SE, 75000, Paris, France

Поступила в редакцию 04.08.2026 г.