

УДК 528.48:621.24

DOI: 10.33764/2411-1759-2020-25-4-77-84

## АНАЛИЗ МЕТОДОВ И СРЕДСТВ КОНТРОЛЯ ЗАЩИТНЫХ СООРУЖЕНИЙ МАГИСТРАЛЬНЫХ ТРУБОПРОВОДОВ

*Валерия Вячеславовна Дедкова*

Сибирский государственный университет геосистем и технологий, 630108, Россия, г. Новосибирск, ул. Плахотного, 10, аспирант кафедры фотограмметрии и дистанционного зондирования, тел. (383)361-08-66, e-mail: v.v.dedkova@sgugit.ru

*Александр Владимирович Комиссаров*

Сибирский государственный университет геосистем и технологий, 630108, Россия, г. Новосибирск, ул. Плахотного, 10, доктор технических наук, доцент, зав. кафедрой фотограмметрии и дистанционного зондирования, тел. (383)361-08-66, e-mail: a.v.komissarov@sgugit.ru

Целью работы является анализ методов и средств дистанционного зондирования для мониторинга состояния различного вида защитных сооружений магистральных нефтепроводов. Произведен анализ причин возникновения аварий на магистральных трубопроводах по данным Федеральной службы по экологическому, технологическому и атомному надзору, а также Министерства энергетики Российской Федерации. В ходе анализа установлено, что все защитные сооружения можно разделить на два вида – инженерные и земляные. Дано обоснование необходимости выполнения мониторинга защитных сооружений. Изложена сущность основных методов активного дистанционного зондирования: радиолокационная съемка, радарная интерферометрия, воздушное, мобильное и наземное лазерное сканирование. Даны характеристики их точности. Выполнено обоснование областей применения методов для мониторинга различных типов инженерных сооружений.

**Ключевые слова:** защитные сооружения, методы активного дистанционного зондирования, контроль, мониторинг, магистральные трубопроводы, аварии, лазерное сканирование, радиолокационная интерферометрия

### *Введение*

Трубопроводная транспортировка является основным способом транспортировки углеводородного сырья и нефтепродуктов на территории России. Большая протяженность трубопроводов – фактор риска возникновения аварий и утечек, что, в свою очередь, может негативно сказаться на состоянии окружающей среды как в зонах размещения трубопроводов, так и на прилегающих территориях и объектах, а загрязненные почвы и воды представляют угрозу для жизни и здоровья человека. Для обеспечения сохранности и целостности трубопроводных конструкций, а также предупреждения чрезвычайных ситуаций, связанных с прорывом трубопровода, предусматривается возведение защитных сооружений.

Анализ источников показал, что на сегодняшний день вопрос контроля состояния защитных сооружений магистральных трубо-

проводов является малоизученным. Авторами выдвинута гипотеза о том, что методы и средства дистанционного зондирования могут быть весьма полезными для контроля состояния защитных сооружений. Целью данной работы является анализ методов и средств дистанционного зондирования, пригодных для проведения планового и оперативного мониторинга защитных сооружений.

Основные задачи, решаемые в данном исследовании:

- анализ использования магистральных трубопроводов как распространенного средства транспортировки нефти и нефтепродуктов на территории России;
- анализ аварий на магистральных трубопроводах и их причин;
- анализ видов защитных сооружений;
- анализ методов и средств дистанционного зондирования, отвечающих требованиям контроля состояния защитных сооружений.

## Методы и материалы

Анализ проводился по российским и зарубежным литературным источникам, посвященным вопросу применения методов и средств дистанционного зондирования для мониторинга технического состояния магистральных трубопроводов и защитных сооружений, причинам возникновения аварийных ситуаций на объектах нефтегазового комплекса, а также современному состоянию транспортировки нефти на территории России.

## Результаты и обсуждение

Нефть вместе с продуктами нефтепереработки является лидирующим товаром российского экспорта. За период с января по август 2020 г. на территории России суммарно добыто более 346 млн тонн нефти (с учетом газового конденсата), из них на экспорт отправлено свыше 158 млн тонн. Более 90 % добываемой нефти транспортируется по магистральным трубопроводам, что подтверждает преимущество данного средства транспортировки как менее затратного (в сравнении с железнодорожным и водным) и более безопасного (небольшие локальные потери нефти, возможность автоматизации технологических процессов, бесперебойность транспортировки вне зависимости от климатических условий). Еще одним неоспоримым преимуществом трубопроводной транспортировки является возможность строительства трубопроводов на территориях с любой степенью сложности геоморфологического строения [1].

В зависимости от назначения трубопроводы подразделяются на группы:

- промысловые – трубопроводы, соединяющие скважины с другими инженерными объектами внутри одного промысла;

- технологические – предназначены для транспортировки нефти, нефтепродуктов и/или иных веществ в границах одного предприятия (группы предприятий), использующихся при эксплуатации оборудования или для обеспечения функционирования технологических процессов;

- магистральные – трубопроводы, по которым нефть и нефтепродукты перекачива-

ются на большие расстояния из районов добычи, переработки и хранения до конечного потребителя.

В зависимости от вида перекачиваемого вещества магистральные трубопроводы делятся на нефтепроводы, газопроводы и нефтепродуктопроводы (мазутопровод, бензинопровод, керосинопровод и др.) [2, 3].

Общая протяженность линейной части магистральных трубопроводов на территории России составляет 264,224 тыс. км (табл. 1) [4].

Таблица 1

Протяженность линейной части магистральных трубопроводов на территории России

Вид	Протяженность, тыс. км
Магистральные газопроводы	173,439
Магистральные продуктопроводы	18,724
Магистральные нефтепроводы	48,309
Трубопроводы широкой фракции легких углеводородов	23,752
Всего	264,224

В период с января по июнь 2020 г. на объектах нефтегазового комплекса произошло 4 аварии, предварительный экономический ущерб от которых составляет 39,712 млн руб. Как показывает анализ данных [4] за 2019 г., в России более 50 % аварий в топливно-энергетическом комплексе произошли на объектах нефтегазовой инфраструктуры. Основные причины аварий – неисправность и износ оборудования [4].

Другими распространенными причинами аварий на трубопроводах являются:

- повреждения при проведении работ в охранной зоне;

- повреждения в результате природных явлений;

- брак при строительстве;

- конструктивные недостатки;

- разлив (несанкционированная врезка);

- ошибки персонала [5–14].

Магистральный трубопровод представляет собой сложный инженерно-технический

комплекс, в состав которого, кроме самого трубопровода, входят:

- установки электрохимической защиты трубопроводов от коррозии, линии и сооружения технологической связи, средства автоматики и телемеханики;

- линии электропередачи, предназначенные для обслуживания трубопроводов и устройства электроснабжения и дистанционного управления запорной арматурой и установками электрохимической защиты трубопроводов, сети связи;

- противопожарные средства, противоэрозионные и защитные сооружения трубопроводов;

- емкости для хранения и разгазирования конденсата, земляные амбары для аварийного выпуска нефти, нефтепродуктов, конденсата и сжиженных углеводородов;

- здания и сооружения линейной службы эксплуатации трубопроводов;

- вдольтрассовые проезды и вертолетные площадки, расположенные вдоль трассы трубопровода, и подъезды к ним, опознавательные и сигнальные знаки местонахождения трубопроводов;

- головные и промежуточные нефтеперекачивающие станции, перекачивающие станции нефтепродуктов и наливные станции, резервуарные парки, КС и ГРС (газораспределительная станция);

- станция подземного хранения газа;

- пункты подогрева нефти и нефтепродуктов;

- указатели и предупредительные знаки [15].

Как видно из перечисленного выше, защитные сооружения являются частью инженерно-технического комплекса магистральных трубопроводов. В случае размещения трубопроводов вблизи населенного пункта или промышленного предприятия с низовой стороны трубопровода проектируются защитные сооружения – защитные валы или канавы для отведения продукта, вышедшего при аварийной утечке, в специальный защитный амбар. Это необходимо для предотвращения попадания нефти или нефтепродукта в водотоки и на территорию населенного пункта. В местах проложения трубопроводов с селевой опасностью предусматриваются упо-

лаживание склонов, водозащитные устройства, дренирование подземных вод, сооружение подпорных стен, контрфорсов [15].

При размещении магистральных трубопроводов на землях сельскохозяйственного назначения для защиты конструктивных элементов трубопровода, выходящих на поверхность (камеры запуска и приема средств очистки и диагностики, задвижки, вантузы и т. д.), а также для защиты сельскохозяйственных угодий от пала используют противопожарные вспашки.

На трассе нефтепроводов, расположенных вблизи крупных рек и водоемов, должны быть возведены аварийные сбросные емкости, в которые возможен сброс нефти при авариях на трубопроводах.

Для аварийного сброса нефти и/или нефтепродуктов предусматривается устройство амбаров путем обвалований из грунтов с содержанием глинистых частиц или устройством глиняных замков, других противодренирующих устройств, когда обвалование сооружается из дренирующих грунтов.

Защита грунтов от эрозии вдоль трассы магистрального трубопровода осуществляется путем закрепления грунтов посадками трав или кустарников либо иными способами. В табл. 2 приведена информация по основным типам защитных сооружений и мероприятий при перекачке нефти и нефтепродуктов трубопроводным способом.

Для всех вышеуказанных сооружений необходимо выполнять периодический контроль в целях обеспечения их стабильного функционирования. При этом крайне важным фактором является обеспечение геометрических характеристик данных объектов.

Для представленных сооружений характерны различные требования к точности и периодичности мониторинга. Так, например, для земляных сооружений в виде обвалований контроль следует выполнять раз в год, а для свайных фундаментов в первые 3–5 лет эксплуатации – 2 раза в год. При этом периодичность мониторинговых мероприятий зависит от выявляемых изменений в сооружениях. Если величина изменения находится в допуске, то используется стандартный режим наблюдений, при выявлении отклонений выше допуска – периодичность наблюдений сокращают в два раза.

Защитные сооружения и мероприятия при перекачке нефти  
и нефтепродуктов с помощью трубопроводов

Защитные сооружения и мероприятия	Назначение
Защитный амбар	Предназначен для аварийного сброса углеводородного сырья или продуктов переработки в случае возникновения аварийной ситуации на трубопроводе и при утечке опасных веществ
Защитные валы и канавы	Предназначены для отведения в защитный амбар нефти и нефтепродуктов, высвободившихся при возникновении утечки на трубопроводе
Противопожарные вспашки	Предназначены для защиты земель сельскохозяйственного назначения в зонах размещения магистральных трубопроводов
Защита грунтов от эрозии	Необходима для предупреждения ветровой и иной эрозии почвы в зонах размещения магистральных трубопроводов
Уполаживание склонов, водозащитные устройства, дренирование подземных вод, сооружение подпорных стен	Проектируются в зонах размещения трубопроводов с выраженной сейсмической активностью

Перспективными методами проведения мониторинговых наблюдений за состоянием защитных сооружений являются средства дистанционного зондирования, которые позволяют провести съемку значительных по протяженности объектов. Из многообразия активных методов дистанционного зондирования для решения подобных задач подходят:

- радиолокационная съемка;
- интерферометрия;
- лазерное сканирование (наземное, мобильное и воздушное).

Радиолокационное изображение создается с помощью приемно-передающего устройства, генерирующего излучаемый импульс и принимающего отраженный сигнал в микроволновой области. Точность создания цифровой модели рельефа и объектов составляет примерно 1,5–3 м.

Радиолокационная интерферометрия основана на совместной обработке двух фазовых полей, которые можно получить либо съемкой одного и того же участка местности одновременно двумя антенными системами, либо съемкой одного и того же участка местности спутниковой системой на разных витках. Построенное изображение на основе раз-

ности фаз называется интерферограммой. Данный метод сочетает в себе высокую точность фазового метода измерения дальности с высокой разрешающей способностью космических радиолокаторов с синтезированной апертурой [16–18]. Точность определения высоты во времени зависит от следующих факторов [19–20]:

- различие длин оптических путей за счет преломления в среде распространения сигнала;
- величина базиса и точность используемой при обработке снимков опорной ЦММ;
- пространственное разрешение радиолокационных снимков и размер угловых отражателей.

Согласно [19], результирующая погрешность определения смещения объектов при использовании угловых отражателей достигает 1–5 мм. При этом важным фактором является необходимость обеспечения когерентности между временными снимками, что достигается небольшими временными интервалами между снимками.

Для контроля состояния защитных сооружений наиболее предпочтительным является метод воздушного лазерного сканирования.

Сущность данного метода заключается в работе полупроводникового лазера, действующего, как правило, в импульсном режиме с рабочей длиной волны в ближнем инфракрасном диапазоне спектра. Лазер излучает коротковолновые импульсы, направление распространения которых регулируется оптической системой и сканирующим элементом. Поперечная развертка обеспечивается за счет использования качающегося зеркала, а продольная – за счет движения носителя вдоль маршрута съемки [21]. Точность определения пространственного положения объектов составляет 10–25 см в зависимости от модели сканера, ГНСС-аппаратуры и инерциальной навигационной системы, типа воздушного судна и параметров полета.

Наземный лазерный сканер (НЛС) подобен электронному тахеометру, выполняющему съемку с определенным шагом и высокой частотой. В основу работы лазерных дальномеров, используемых в наземных лазерных сканерах, положены импульсный и фазовый безотражательные методы измерения расстояний, а также метод прямой угловой засечки.

В качестве блока развертки в НЛС выступают сервопривод и полигональное зеркало или призма. Сервопривод отклоняет луч на заданную величину в горизонтальной плоскости, при этом поворачивается вся верхняя часть сканера, которая называется головкой. Развертка в вертикальной плоскости осуществляется за счет вращения или качания зеркала.

В процессе сканирования фиксируются направление распространения лазерного луча и расстояние до точек объекта. Результатом работы НЛС является растровое изображение – скан. Точность определения координат точек объекта составляет 5–50 мм в зависимости от модели сканера, методики обработки и параметров съемки [22].

При выполнении мониторинга с помощью наземного лазерного сканера выявлена осадка фундамента защитного сооружения на 3 см, в результате чего появились трещины (рисунок).

Мобильное лазерное сканирование подобно воздушному лазерному сканированию,

только вместо воздушного судна используется наземный или водный транспорт. Точность метода варьируется от 5 до 10 см.



Повреждение конструкции фундамента защитного сооружения

### Выводы

Согласно проведенному анализу, можно сделать вывод, что в зависимости от требуемой точности и охвата наблюдаемой территории, для мониторинга земляных защитных сооружений, амбаров аварийного сброса, обвалований и др., расположенных в зонах размещения магистральных нефтепроводов, наиболее подходящим методом является воздушное лазерное сканирование.

Для мониторинга инженерных защитных сооружений, таких как подпорная стенка, защитное ограждение, опоры и т. п., где регламентирована миллиметровая точность, возможно использование радарной интерферометрии. При этом на точках, подлежащих контролю, необходимо устанавливать угловые отражатели.

Наземное лазерное сканирование возможно использовать для мониторинга защитных сооружений, расположенных внутри нефтеперекачивающих станций, нефтяных баз, нефтяных заводов и т. д.

Использование же пассивных методов дистанционного зондирования (например, аэрофотосъемка с пилотируемых и беспилотных носителей) требует значительных трудозатрат при обработке материалов.

Работа выполнена в рамках государственного задания Минобрнауки России (тема «Разработка теории и технологических решений контроля состояния защитных сооружений при перекачке нефтепродуктов методами активного дистанционного зондирования», № 0807-2020-0002).

#### БИБЛИОГРАФИЧЕСКИЙ СПИСОК

1. Статистика. Сайт Министерства энергетики Российской Федерации [Электронный ресурс]. – Режим доступа: <https://minenergo.gov.ru/activity/statistic> (дата обращения: 08.09.2020).
2. Васильев Г. Г., Коробков Г. Е., Коршак А. А. и др. Трубопроводный транспорт нефти / под ред. С. М. Вайнштока : учеб. для вузов: в 2 т. – М. : ООО «Недра-Бизнесцентр», 2002. – Т. 1. – 407 с.
3. Кудинов В. И. Основы нефтегазопромыслового дела. – М. ; Ижевск : Институт компьютерных исследований : Удмуртский госуниверситет, 2004. – 720 с.
4. Надзор за объектами нефтегазового комплекса. Сайт Федеральной службы по экологическому, технологическому и атомному надзору Ростехнадзор [Электронный ресурс]. – Режим доступа: <http://www.gosnadzor.ru/industrial/oil/lessons/2019%20год/index.php> (дата обращения: 08.09.2020).
5. Комаров В. А., Семенова З. В., Бронников Д. А., Нигрей А. А. О структуре системы физической защиты магистральных трубопроводов от преднамеренных угроз // Вестник ПНИПУ. Геология. Нефтегазовое и горное дело. – 2019. – Т. 19, № 1. – С. 87–100.
6. Нестеренко М. Ю., Карпюк М. С., Влацкий В. В. Автоматизированная распределенная ГИС-система мониторинга и оценки риска функционирования природно-техногенных объектов нефтегазовой промышленности // Российскому научному обществу анализа риска 15 лет: основные итоги и перспективы деятельности : сб. – М., 2018. – С. 347–352.
7. Ушивцева Л. Ф., Соловьева А. В., Ермолина А. В. Воздействие геологических процессов на функционирование объектов инфраструктуры // Геология, география и глобальная энергия. – 2016. – № 3 (62). – С. 49–60.
8. Кузьмина Е. С., Варнаков В. В. Анализ причин возникновения чрезвычайных ситуаций на объектах хранения нефти и нефтепродуктов // Modern Science. – 2019. – № 4 (1). – С. 379–383.
9. Аскарлов Р. М., Китаев С. В., Исламов И. М. О технологии выявления участков трубопроводов с изгибными напряжениями при пересечении ими геодинамических зон // Изв. Томского политехнического университета. Инжиниринг георесурсов. – 2019. – Т. 330, № 5. – С. 18–25.
10. Adegboye M. A. Recent advances in pipeline monitoring and oil leakage detection technologies: principles and approaches. – 2019 [Electronic resource]. – Режим доступа: [https://www.researchgate.net/publication/333602897\\_Recent\\_Advances\\_in\\_Pipeline\\_Monitoring\\_and\\_Oil\\_Leakage\\_Detection\\_Technologies\\_Principles\\_and\\_Approaches](https://www.researchgate.net/publication/333602897_Recent_Advances_in_Pipeline_Monitoring_and_Oil_Leakage_Detection_Technologies_Principles_and_Approaches).
11. Foroushani M. A. Remote sensing for physical protection of the pipeline network online monitoring of corridor based infrastructure. – 2010 [Electronic resource]. – Режим доступа: [https://www.isprs.org/proceedings/xxxviii/part7/b/pdf/16\\_XXXVIII-part7B.pdf](https://www.isprs.org/proceedings/xxxviii/part7/b/pdf/16_XXXVIII-part7B.pdf).
12. Минкин Д. Ю., Терехин С. Н., Корольков А. П., Османов Ш. А. Космический тепловизионный мониторинг нефтегазопроводного транспорта // Пожаровзрывобезопасность. – 2017. – Т. 26, № 12. – С. 45–51.
13. Manekiya M. Leakage detection and estimation using IR thermography. – 2016 [Electronic resource]. – Режим доступа: [https://www.researchgate.net/publication/311254439\\_Leakage\\_detection\\_and\\_estimation\\_using\\_IR\\_thermography](https://www.researchgate.net/publication/311254439_Leakage_detection_and_estimation_using_IR_thermography).
14. Hausamann D. Monitoring of gas transmission pipelines – a customer driven civil UAV application. – 2010 [Electronic resource]. – Режим доступа: [https://www.researchgate.net/publication/224779029\\_Monitoring\\_of\\_gas\\_transmission\\_pipelines\\_-\\_a\\_customer\\_driven\\_civil\\_UAV\\_application](https://www.researchgate.net/publication/224779029_Monitoring_of_gas_transmission_pipelines_-_a_customer_driven_civil_UAV_application).
15. Свод правил 36.13330.2012 «СНИП 2.05.06-85\* Магистральные трубопроводы» (последняя редакция) [Электронный ресурс]. – Доступ из справ.-правовой системы «КонсультантПлюс».
16. Hanssen R. F. Radar interferometry. Data interpretation and error analysis. – Kluwer academic publishers, 2002. – 380 p.
17. Goldstein R. M., Li F. K. et al. Synthetic aperture radar interferometry // Proceedings of the IEEE. – 2000. – Vol. 88, No. 3. – P. 333–381.
18. Верба В. С., Неронский Л. Б., Осипов И. Г., Турук В. Э. Радиолокационные системы землеобзора космического базирования. – М. : Радиотехника, 2010. – 680 с.

19. Оньков И. В. Оценка точности построения ЦМР методом радарной интерферометрии по снимкам ALOS/PALSAR // Геоматика. – 2012. – № 3. – С. 35–44.
20. Добрынин И. И., Савин А. И., Севастьянов Н. Н. Исследование факторов, влияющих на точность измерения смещений методом радарной интерферометрии с использованием уголкового отражателя // Современные проблемы дистанционного зондирования Земли из космоса. – 2018. – Т. 15, № 3. – С. 29–36.
21. Данилин И. М., Медведев Е. М., Мельников С. Р. Лазерная локация земли и леса : учеб. пособие. – Красноярск : Ин-т леса им. В. Н. Сукачева СО РАН, 2005. – 182 с.
22. Комиссаров А. В., Середович В. А., Комиссаров Д. В., Широкова Т. А. Наземное лазерное сканирование : монография. – Новосибирск : СГГА, 2009. – 261 с.

Получено 02.10.2020

© В. В. Дедкова, А. В. Комиссаров, 2020

## ANALYSIS OF METHODS AND MEANS OF CONTROL OF MAIN PIPELINES' PROTECTIVE STRUCTURES

*Valeriya V. Dedkova*

Siberian State University of Geosystems and Technologies, 10, Plakhotnogo St., Novosibirsk, 630108, Russia, Ph. D. Student, Department of Photogrammetry and Remote Sensing, phone: (383)361-08-66, e-mail: v.v.dedkova@sgugit.ru

*Alexander V. Komissarov*

Siberian State University of Geosystems and Technologies, 10, Plakhotnogo St., Novosibirsk, 630108, Russia, D. Sc., Head of the Department of Photogrammetry and Remote Sensing, phone: (383)361-08-66, e-mail: a.v.komissarov@sgugit.ru

The purpose of research is to justify methods and means of remote sensing for monitoring of technical state of various types of main pipelines' protective structures. An analysis of accidents at main pipelines based on the data of the Federal Service for Ecological, Technological and Nuclear Supervision, as well as the Ministry of Energy of the Russian Federation is given. The analysis revealed that all protective structures are divided into 2 types - engineering and earth structures. The essence of main methods of active remote sensing is described: radar imaging, radar interferometry, aerial, mobile and ground laser scanning. Accuracy characteristics are given. Justification of monitoring methods application for various types of engineering structures is performed.

**Keywords:** protective structures, active remote sensing methods, control, monitoring, main pipelines, accidents, laser scanning, radar interferometry

## REFERENCES

1. Statistics. Site of Ministry of energy of Russian Federation. (n. d.). Retrieved from <https://minenergo.gov.ru/activity/statistic> (accessed date 08.09.2020) [in Russian].
2. Vasilyev, G. G., Korobkov, G. E., Korshak, A. A., & et al. (2002). *Truboprovodnyj transport nefti: T. 1 [Oil Pipeline Transport: Vol. 1.]*. S. M. Weinshtok (Ed.). Moscow: ООО "Nedra-Biznestsentr" Publ., 407 p. [in Russian].
3. Kudinov, V. I. (2004). *Osnovy neftegazopromyslovogo dela [Basics of oil and gas industry]*. Moscow-Izhevsk: Institute of Computer Science Publ., Udmurt State University Publ., 720 p. [in Russian].
4. Supervision of oil and gas facilities. Site of Federal Environmental, Industrial and Nuclear Supervision Service (Rostekhnadzor). (n. d.). Retrieved from <http://www.gosnadzor.ru/industrial/oil/lessons/2019%20год/index.php> [in Russian].
5. Komarov, V. A., Semenova, Z. V., Bronnikov, D. A., & Nigrej, A. A. (2019). On the structure of the system of physical protection of trunk pipelines against intentional threats. *Vestnik PNIPU. Geologiya. Neftgazovoe i gornoe delo [Perm Journal of Petroleum and Mining Engineering]*, 19(1), 87–100 [in Russian].

6. Nesterenko, M. Yu. Karpyuk, M. S., & Vlackij, V. V. (2018). Automated distributed gis-system of monitoring and risk assessment of the functioning of natural and technogenic objects of the oil and gas industry. In *Sbornik: Rossijskomu nauchnomu obshchestvu analiza riska 15 let: osnovnye itogi i perspektivy deyatel'nosti [Proceedings of Russian Scientific Society of Risk Analysis 15 years: Main Results and Prospects of Activity]* (pp. 347–352). Moscow [in Russian].
7. Ushivtseva, L. F., Solovyova, A. V., & Yermolina, A. V. (2016). Impact of geological processes on functioning of infrastructure. *Geologiya, geografiya i global'naya energiya [Geology, Geography and Global Energy]*, 3(62), 49–60 [in Russian].
8. Kuzmina, E. S., & Varnakov, A. A. (2019). Analysis of causes of emergency situations at oil and oil products storage facilities. *Modern Science*, 4(1), 379–383 [in Russian].
9. Askarov, R. M., Kitaev, S. V., & Islamov, I. M. (2019). On technology of detecting pipeline sites with bending voltages in their crossing geodynamic zones. *Izvestiya Tomskogo politekhnicheskogo universiteta. Inzhiniring georesursov [Bulletin of the Tomsk Polytechnic University. Geo Assets Engineering]*, 330(5), 18–25 [in Russian].
10. Adegboye, M. A. (2019). Recent advances in pipeline monitoring and oil leakage detection technologies: principles and approaches. Retrieved from [https://www.researchgate.net/publication/333602897\\_Recent\\_Advances\\_in\\_Pipeline\\_Monitoring\\_and\\_Oil\\_Leakage\\_Detection\\_Technologies\\_Principles\\_and\\_Approaches](https://www.researchgate.net/publication/333602897_Recent_Advances_in_Pipeline_Monitoring_and_Oil_Leakage_Detection_Technologies_Principles_and_Approaches).
11. Foroushani, M. A. (2010). Remote sensing for physical protection of the pipeline network online monitoring of corridor based infrastructure. Retrieved from [https://www.isprs.org/proceedings/xxxviii/part7/b/pdf/16\\_XXXVIII-part7B.pdf](https://www.isprs.org/proceedings/xxxviii/part7/b/pdf/16_XXXVIII-part7B.pdf).
12. Minkin, D. Yu., Terekhin, S. N., Korol'kov, A. P., & Osmanov, Sh. A. (2017). Space thermovision monitoring of oil and gas transportation. *Pozharovzryvobezopasnost' [Fire and explosion safety]*, 26(12), 45–51 [in Russian].
13. Manekiya, M. (2016). Leakage detection and estimation using IR thermography. Retrieved from [https://www.researchgate.net/publication/311254439\\_Leakage\\_detection\\_and\\_estimation\\_using\\_IR\\_thermography](https://www.researchgate.net/publication/311254439_Leakage_detection_and_estimation_using_IR_thermography)
14. Hausamann, D. (2010). Monitoring of gas transmission pipelines – a customer driven civil UAV application. Retrieved from [https://www.researchgate.net/publication/224779029\\_Monitoring\\_of\\_gas\\_transmission\\_pipelines\\_-\\_a\\_customer\\_driven\\_civil\\_UAV\\_application](https://www.researchgate.net/publication/224779029_Monitoring_of_gas_transmission_pipelines_-_a_customer_driven_civil_UAV_application).
15. Code of Practice 36.13330.2012 "SNIP 2.05.06-85\* Trunk pipelines" (last edition). Retrieved from <http://docs.cntd.ru/document/1200103173> [in Russian].
16. Hanssen R. F. (2002). *Radar interferometry. Data interpretation and error analysis*. Kluwer Academic Publishers, 380 p.
17. Goldstein, R. M., Li, F. K., & et al. (2000). Synthetic aperture radar interferometry. *Proceedings of the IEEE*, 88(3), 333–381.
18. Verba, V. S., Neronskij, L. B., Osipov, I. G., & Turuk, V. E. (2010). *Radiolokacionnye sistemy zemleobzora kosmicheskogo bazirovaniya [Space-based ground survey radar systems]*. Moscow: Radiotekhnika Publ., 680 p. [in Russian].
19. Onkov, I. (2012). Evaluation of DEM creation accuracy via ALOS/PALSAR data using methods of radar interferometry. *Geomatika [Geomatics]*, 3, 35–44 [in Russian].
20. Dobrynin, I. I., Savin, A. I., Sevastyanov, N. N. (2018). Study of factors affecting displacement measurement accuracy by radar interferometry method in various frequency bands using corner reflectors. *Sovremennye problemy distantsionnogo zondirovaniya Zemli iz kosmosa [Current Problems in Remote Sensing of the Earth from Space]*, 15(3), 29–36 [in Russian].
21. Medvedev, E. M., Danilin, I. M., & Mel'nikov, S. R. (2007). *Lazernaya lokatsiya zemli i lesa [LASER location of Earth and forest]*. Krasnoyarsk: V. N. Sukachev Institute of Forest, Russian Academy of Sciences, Siberian Branch, 230 p. [in Russian].
22. Komissarov, A. V., Seredovich, V. A., Komissarov, D. V., & Shirokova, T. A. (2009). *Nazemnoe lazernoe skanirovanie [Land laser scanning]*. Novosibirsk: SSGA Publ., 261 p. [in Russian].

Received 02.10.2020

© V. V. Dedkova, A. V. Komissarov, 2020