

Журнал издается 29-й год (с 1992 г.) и продолжает традиции периодических научно-технических изданий по маркшейдерскому делу, выходявших в России и СССР в 1910–1936 гг.



УЧРЕДИТЕЛИ

ООО «СОЮЗ МАРКШЕЙДЕРОВ РОССИИ»
ЧУ «ЦДПО «Горное образование»

ИЗДАТЕЛЬ

ЧУ «ЦДПО «Горное образование»

РЕДАКЦИЯ

Главный редактор

СУЧЕНКО Владимир Николаевич, д.т.н.
тел. +7 (499) 261-51-51

Зам. главного редактора

НИКИФОРОВА Ирина Львовна
тел. +7 (926) 247-32-51

Редактор

КАПИТОНОВ Сергей Иванович
тел. +7 (916) 919-82-71

РЕДАКЦИОННЫЙ СОВЕТ

Кашников Юрий Александрович
председатель редакционного совета,
д.т.н., профессор, зав. кафедрой
Пермского ГТУ

Алексеев Андрей Борисович
начальник отдела маркшейдерского контроля
и безопасного недропользования Ростехнадзора

Гальянов Алексей Владимирович
д.т.н., профессор УГГУ

Глейзер Валерий Иосифович
д.т.н., зам. ген. директора
ООО «Геодезические приборы»

Гордеев Виктор Александрович
д.т.н., профессор, Кубанский государственный
технологический университет

Грицков Виктор Владимирович
председатель Совета НП «СРГП «Горное дело»

Гусев Владимир Николаевич
д.т.н., профессор, зав. кафедрой
Санкт-Петербургского горного университета

Затырко Виктор Алексеевич
к.т.н., главный маркшейдер ПАО «Газпром»

Зимич Владимир Степанович
президент ООО «Союз маркшейдеров России»

Зыков Виктор Семенович

д.т.н., профессор,
Кемеровский филиал АО «ВНИМИ»

Иофис Михаил Абрамович

д.т.н., профессор, г.н.с. ИПКОН РАН

Кузьмин Юрий Олегович
д.ф.-м.н., профессор, исп. директор ИФЗ
им. О. Ю. Шмидта РАН

Лаптева Марина Игоревна
главный маркшейдер АО «СУЭК»

Макаров Александр Борисович

д.т.н., профессор, член-корр. РАЕН
Навитный Аркадий Михайлович
зам. директора – начальник Управления
маркшейдерии, геологии и охраны природы
ФГБУ «ГУРШ»

Низаметдинов Фарит Камалович

д.т.н., профессор КарГТУ

Ожигин Сергей Георгиевич

д.т.н., профессор, проректор
по научной работе КарГТУ

Черепнов Андрей Николаевич

главный инженер ПАО «АЛРОСА»

ПОЧТОВЫЙ АДРЕС: 107078, г. Москва, а/я № 164

МЕСТО НАХОЖДЕНИЯ: 105064, г. Москва,
Гороховский пер., д. 5, оф. 16

ТЕЛЕФОН РЕДАКЦИИ: +7 (499) 261-51-51

Е-МАЙЛ: mark_vestnik@mail.ru

САЙТ ЖУРНАЛА www.mvest.su

ПОДПИСНЫЕ ИНДЕКСЫ

Агентства Роспечати 71675

Пресса России 90949

Урал-Пресс 71675

АРЗИ Э90949

Рукопт Э33357

В течение года можно оформить подписку на журнал
через редакцию

РЕГИСТРАЦИОННОЕ СВИДЕТЕЛЬСТВО

ПИ № ФС 77-73242 от 13.07.2018 г.

ISSN 2073-0098

Выходит 6 раз в год

ОРИГИНАЛ-МАКЕТ: ООО «Дизайнерский центр
«ВАЙН ГРАФ»

ОТПЕЧАТАНО В ТИПОГРАФИИ: ООО «Андоба Пресс»

ЗАКАЗ № 52

ТИРАЖ 990 экз.

За точность приведенных сведений и содержание данных, не под-
лежащих открытой публикации, несут ответственность авторы.
Мнения авторов могут не совпадать с мнением редакции.
Рукописи не возвращаются!

© **ЖУРНАЛ «МАРКШЕЙДЕРСКИЙ ВЕСТНИК»**

СОДЕРЖАНИЕ

ПРАВОВЫЕ ВОПРОСЫ НЕДРОПОЛЬЗОВАНИЯ

- В. В. Грицков* ТРАНСФОРМАЦИЯ ЗАКОНОДАТЕЛЬСТВА О ПРОМЫШЛЕННОЙ БЕЗОПАСНОСТИ..... 4
V. V. Gritskov TRANSFORMATION OF INDUSTRIAL SAFETY LEGISLATION

ГЕОДЕЗИЯ, МАРКШЕЙДЕРИЯ, ГИС

- В. А. Гордеев* «ОШИБКА» ИЛИ «ПОГРЕШНОСТЬ»? 8
V. A. Gordeev "ERROR" OR "FAULT"?

- В. В. Серков, Д. Х. Резванов, Д. М. Гилаев, А. А. Загреддинов* МЕТОДИКА, ТЕХНОЛОГИИ И ОПЫТ ПРИМЕНЕНИЯ НАЗЕМНОГО ЛАЗЕРНОГО СКАНИРОВАНИЯ ДЛЯ АВТОМАТИЗИРОВАННОЙ ИНСПЕКЦИИ РЕЗЕРВУАРОВ..... 15
V. V. Serkov, D. Kh. Rezvanov, D. M. Gilaev, A. A. Zagretdinov METHODOLOGY, TECHNOLOGY AND EXPERIENCE OF USING SURFACE LASER SCANNING FOR AUTOMATED INSPECTION OF TANKS

- Н. С. Павлов, В. А. Наянова, Д. А. Быкасов, М. Г. Мустафин* ИНТЕРПРЕТАЦИЯ РЕЗУЛЬТАТОВ ГЕОДЕЗИЧЕСКИХ НАБЛЮДЕНИЙ ЗА ДЕФОРМАЦИЯМИ ОБЪЕКТА КУЛЬТУРНОГО НАСЛЕДИЯ «БАНКИРСКОГО ДОМА ВАВЕЛЬБЕРГА» В САНКТ-ПЕТЕРБУРГЕ..... 24
N. S. Pavlov, V. A. Nayanova, D. A. Bykasov, M. G. Mustafin INTERPRETATION OF THE RESULTS OF GEODETIC OBSERVATIONS FOR DEFORMATIONS OF THE CULTURAL HERITAGE OBJECT "BANKER HOUSE WAWELBERG" IN ST. PETERSBURG

- В. В. Курбатова* ВЕРИФИКАЦИЯ АЭРОФОТОСЪЕМКИ И GNSS-СЪЕМКИ РУДНЫХ СКЛАДОВ 33
V. V. Kurbatova VERIFICATION OF AERIAL AND GNSS SURVEYS OF ORE WAREHOUSES

- Л. И. Булатова, Д. М. Гилаев, Р. Р. Назаров* ОПЫТ И ПЕРСПЕКТИВЫ ИСПОЛЬЗОВАНИЯ РАДАРНОЙ СЪЕМКИ ДЛЯ ГЕОДИНАМИЧЕСКОГО МОНИТОРИНГА НЕФТЯНЫХ МЕСТОРОЖДЕНИЙ..... 38
L. I. Bulatova, D. M. Gilaev, R. R. Nazarov EXPERIENCE AND PROSPECTS OF USING RADAR IMAGERY FOR GEODYNAMIC MONITORING OF OIL FIELDS

ГОРНАЯ ГЕОМЕХАНИКА

- Б. В. Хохлов, Л. А. Камбурова, В. Ф. Филатов, А. В. Рыженко* ПРОГНОЗ ДОЛГОВРЕМЕННОЙ ГЕОМЕХАНИЧЕСКОЙ УСТОЙЧИВОСТИ СКИПОВОГО СТВОЛА СП «ЛШ «БУТОВСКАЯ» РП «ДОНБАССУГЛЕРЕСТРУКТУРИЗАЦИЯ» ПРИ ИСПОЛЬЗОВАНИИ ЕГО В СОСТАВЕ ВОК С ПОГРУЖНЫМИ НАСОСАМИ..... 44
B. V. Khokhlov, L. A. Kamburova, V. F. Filatov, A. V. Ryzhenko FORECAST OF LONG-TERM GEOMECHANICAL STABILITY OF THE SKIP SHOULDER JV «LSH "BUTOVSKAYA" RP "DONBASSUGLERESTRUCTURIZATION"» WHEN USING IT IN THE COMPOSITION OF DRAIN COMPLEX WITH SUBMERSIBLE PUMPS

ВОПРОСЫ ГЕОТЕХНОЛОГИИ

В. И. Ляшенко, О. Е. Хоменко ПОВЫШЕНИЕ ЭФФЕКТИВНОСТИ И ЭКОЛОГИЧЕСКОЙ БЕЗОПАСНОСТИ КОМБИНИРОВАННЫХ ГЕОТЕХНОЛОГИЙ РАЗРАБОТКИ РУДНЫХ МЕСТОРОЖДЕНИЙ..... 51

V. I. Lyashenko, O. E. Khomenko INCREASING THE EFFICIENCY AND ENVIRONMENTAL SAFETY OF COMBINED GEOTECHNOLOGIES DEVELOPMENT OF ORE DEPOSITS

В. Н. Комлев К ГОРНО-ГЕОЛОГИЧЕСКОМУ ОБОСНОВАНИЮ ПОДЗЕМНОГО ОБЪЕКТА ЗАКЛЮЧИТЕЛЬНОЙ СТАДИИ ЯДЕРНОГО ТОПЛИВНОГО ЦИКЛА 57

V. N. Komlev TO MINING AND GEOLOGICAL VALIDATION OF THE UNDERGROUND OBJECT OF THE FINAL STAGE OF THE NUCLEAR FUEL CYCLE

ЮБИЛЕИ

90 ЛЕТ ПАНФИЛОВУ ЕВГЕНИЮ ИВАНОВИЧУ..... 64

90 YEARS OF PANFILOV EVGENY IVANOVICH

НАША ПАМЯТЬ

ПАМЯТИ ИОФИСА МИХАИЛА АБРАМОВИЧА..... 65

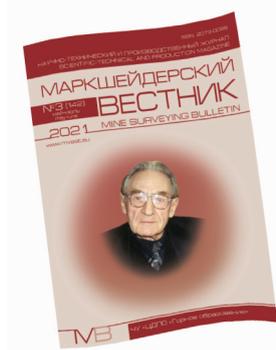
IN MEMORY OF IOFIS MIKHAIL ABRAMOVICH

К 100-ЛЕТИЮ СО ДНЯ РОЖДЕНИЯ КОНСТАНТИНА СЕРГЕЕВИЧА ВОРКОВАСТОВА – ОСНОВАТЕЛЯ И ПЕРВОГО ГЛАВНОГО РЕДАКТОРА ЖУРНАЛА «МВ» (1921–2010)..... 66

ON THE 100th ANNIVERSARY OF KONSTANTIN SERGEYEVICH VORKOVASTOV, THE FOUNDER AND FIRST EDITOR-IN-CHIEF OF THE MINE SURVEYING BULLETIN (1921–2010)

НА ФОТОГРАФИИ ПЕРВОЙ СТРАНИЦЫ ОБЛОЖКИ:

Ворковастов Константин Сергеевич (1921–2010)



Ворковастов Константин Сергеевич – горный инженер-маркшейдер, кандидат технических наук, ветеран Великой Отечественной войны, ветеран труда СССР, золотоплатиновой промышленности и Магаданской области, Почетный член Международной академии информатизации, один из основных инициаторов создания Общероссийской общественной организации «Союз маркшейдеров России», ее исполнительный директор (1999–2001) и Почетный член.

Константин Сергеевич – один из организаторов НТиП журнала «Маркшейдерский вестник», его первый главный редактор (1992-1998 гг.) и сотрудник до своей кончины.

В. В. Серков, Д. Х. Резванов, Д. М. Гилаев, А. А. Загретдинов

МЕТОДИКА, ТЕХНОЛОГИИ И ОПЫТ ПРИМЕНЕНИЯ НАЗЕМНОГО ЛАЗЕРНОГО СКАНИРОВАНИЯ ДЛЯ АВТОМАТИЗИРОВАННОЙ ИНСПЕКЦИИ РЕЗЕРВУАРОВ

Безопасная эксплуатация нефтеналивных резервуаров, в частности резервуаров вертикальных стальных (РВС), подразумевает регулярные инспекции конструкции на проверку соответствия требованиям, определяемым в нормативных документах. Современные технологии и нормативно-правовая база позволяют применять методы наземного лазерного сканирования (НЛС) для выполнения измерений и определения геометрии резервуара. В статье, на примере реализованного проекта, рассматривается методика проведения инспекции резервуаров методами НЛС с применением технологий Trimble, включающих оборудование и программное обеспечение. Продемонстрирована высокая эффективность применяющихся технологий.

Ключевые слова: наземное лазерное сканирование; нефтяные резервуары; мониторинг деформаций; Trimble; инспекция резервуаров; облако точек.

V. V. Serkov, D. Kh. Rezvanov, D. M. Gilaev, A. A. Zagretdinov

METHODOLOGY, TECHNOLOGY AND EXPERIENCE OF USING SURFACE LASER SCANNING FOR AUTOMATED INSPECTION OF TANKS

Safe operation of oil tanks implies regular inspections of the structure to verify compliance with the requirements specified in regulatory documents. Modern technologies and regulatory documents allow the use of surface laser scanning methods to perform measurements and determine the geometry of the tanks. The article, based on the example of a completed project, examines a methodology for inspecting tanks using ground laser scanning methods based on Trimble technologies, including equipment and software, demonstrating high efficiency of the applied technologies.

Keywords: surface laser scanning; petroleum tanks; storage tank inspection; deformation monitoring; Trimble; oil tank inspection; point cloud.

Использование технологий наземного лазерного сканирования для диагностики нефтяных резервуаров

Резервуары для хранения нефти и нефтепродуктов относятся к объектам повышенной экологической опасности, поскольку работают в сложном напряженно-деформированном состоянии, обусловленном одновременным действием гидростатического давления хранимого нефтепродукта, значительного перепада температур, ветровой и снеговой нагрузки, неравномерными осадками и сейсмическими явлениями [1].

На территории РФ на данный момент эксплуатируется более 40 млн кубометров резервуарных емкостей, используемых для хранения различных веществ повышенного класса опасности. Для их безопасной эксплуатации необходимо проводить регулярный и периодический мониторинг. Методами классической геодезии получить требуемый объем качественной и количественной информации в короткие сроки практически невозможно, лазерное 3D-сканирование позволяет решать такие задачи максимально эффективно.

Нормативно-правовая база на сегодняшний день позволяет использовать методы наземного лазерного сканирования для выполнения точных измерений РВС и определения отклонений вертикальных образующих и поясов резервуара.

Наземное лазерное сканирование (НЛС) – бесконтактная технология определения пространственных координат точек поверхности объекта. Реализуется с применением лазерных сканеров или сканирующих тахеометров, посредством измерения расстояния до всех определяемых точек с помощью лазерного безотражательного дальномера. Благодаря своей универсальности и высокой степени автоматизации процессов измерений лазерное сканирование – это инструмент оперативного решения самого широкого круга прикладных инженерных задач. 3D лазерное сканирование широко применяется в маркшейдерии, геодезии архитектуре и др. Первичным продуктом лазерного сканирования является высокоточное облако точек объекта – пространственная 3D-модель резервуара.

Облако точек обладает высокой пространственной точностью данных, а по сравнению с классическими данными тахеометрических измерений 3D-модель резервуара несет в себе максимум требуемой информации о конструкции РВС для проведения инспекции и анализа деформаций.

Методы НЛС позволяют существенно сократить трудоемкость процесса измерений, повысить точность и имеют ряд существенных преимуществ в сравнении с традиционными методами деформационного мониторинга с применением тахеометра для съемки характерных точек конструкции:

- высокая детализация и точность данных;
- низкая доля полевого этапа в общих трудозатратах;
- высокая степень автоматизации, практически исключая влияние субъективных факторов на результат лазерного сканирования;
- переход к работе с 3D-моделью.

Комплексное решение Trimble для инспекции резервуаров

Корпорация Trimble является крупнейшим мировым производителем оборудования

и программного обеспечения в области точных геодезических измерений, в том числе поставщиком специализированных решений для задач деформационного мониторинга. Решение Trimble для мониторинга резервуаров методами НЛС может включать:

- сканирующий тахеометр Trimble SX10 (3D лазерное сканирование; измерение осадочных марок);
- цифровой нивелир Trimble DiNi (геометрическое нивелирование);
- программное обеспечение Trimble Business Center (развитие съемочного обоснования, уравнивание опорной сети и облаков точек);
- программное обеспечение Trimble RealWorks Advanced-Tank Edition (обработка облаков точек, измерение параметров, определение отклонений, создание отчета).

Некоторые компоненты решения Trimble, например сканирующий тахеометр Trimble SX10 и программное обеспечение Trimble RealWorks Advanced-Tank Edition, обладают уникальными особенностями, что позволяет существенно повысить эффективность процесса инспекции резервуаров.

Trimble SX10 позволяет объединять высокоточные геодезические измерения и данные 3D-сканирования высокой плотности, а также осуществлять привязку опорных точек сканирования в необходимую систему координат сразу во время производства работ. Такой подход позволяет маркшейдерам и геодезистам работать по привычным для них технологиям, исключить ошибки и повысить скорость и точность выполнения работ. Облака точек получаются сразу в системе координат пользователя, тем самым не требуется последующая регистрация сканов и контроль перекрытия между ними, а также не требуются цели и марки. Функция выделения участка сканирования позволяет выполнять сканирование только необходимых участков и оптимизировать время работы.

Программное обеспечение Trimble RealWorks Advanced-Tank Edition является специализированным модулем в пакете программ Trimble RealWorks и предназначен для автоматизации обработки измерений при деформационном мониторинге нефтяных резервуаров.

Данный модуль обладает встроенной функциональностью по автоматической классификации нефтяных резервуаров с их элементами по облакам точек и проведению автоматических измерений (отклонение от вертикали; базовая высота; наклон резервуара; уклон отмостки; горизонтальность крайки; анализ дефектов поверхности резервуара и др.), а также построению стандартизованных отчетов по результатам мониторинга, соответствующих международным и российским требованиям.

Более подробно функциональность данного программного обеспечения представлена ниже, на примере реализованного проекта мониторинга резервуарного парка в ПАО «Татнефть».

Проект мониторинга резервуарного парка ПАО «Татнефть» методом наземного лазерного сканирования

В рамках представленного проекта работы выполнялись на промышленной площадке дожимной насосной станции ПАО «Татнефть».

Целью работ было определение деформаций резервуаров вертикальных стальных (РВС), а также выполнение геометрического нивелирования осадочных марок и получение сравнительных данных по их высотным отметкам.

Ниже приведен объем выполненных работ, который определялся инструкциями и РД и включал следующие этапы:

1. Измерительные работы (сканирующий тахеометр Trimble SX10):

- выполнение 3D лазерного сканирования РВС и промышленной площадки ДНС;

- съемка осадочных марок днища РВС [2, 4, 5];

- развитие съемочного обоснования от опорных пунктов (программное обеспечение Trimble Business Center).

2. Работы по нивелированию (цифровой нивелир Trimble DiNi 0.3):

- геометрическое нивелирование II класса грунтовых реперов;

- геометрическое нивелирование IV класса осадочных марок РВС [3].

3. Камеральная обработка данных измерений:

- получение топографических материалов РВС и промышленной площадки (программное обеспечение Trimble Business Center);

- обработка облаков точек, определение и анализ деформаций РВС (программное обеспечение Trimble RealWorks Advanced-Tank Edition).

Полевые и камеральные работы по наземному лазерному сканированию резервуарного парка с применением технологий Trimble

Проверка вертикальности стенки РВС определяется сканирующим тахеометром Trimble SX10 методом 3D лазерного сканирования. Сканирование выполняется при проведении диагностирования резервуара с целью получения пространственных координат поверхности стенки РВС в виде облака точек, необходимого для проведения измерения отклонения образующих от вертикали, в соответствии с требованиями НТД и с заданной точностью и дискретностью [6].

После выполнения полевых работ по 3D лазерному сканированию РВС и промышленной площадки было выполнено уравнивание опорной сети и облаков точек в программном обеспечении Trimble Business Center (рис. 1) с автоматической классификацией облаков точек для целей разделения данных и создания топографических материалов.

Далее был произведен импорт облаков точек РВС в программный модуль Trimble RealWorks Advanced-Tank Edition (рис. 2) для последующей обработки измерений и определения деформаций РВС.

После импорта облаков точек в модуле Trimble RealWorks Advanced-Tank Edition были произведены измерения характерных параметров РВС и определены отклонения от номинальных по представленной методике на примере РВС № 2 3000 м³, соответствующей международным стандартам и российским РД.

На первом этапе работ производится импорт облаков точек в программный модуль для автоматической классификации РВС (рис. 3) и его составных частей:

- тип резервуара: вертикальный или горизонтальный;

- вид сканирования: снаружи или изнутри;

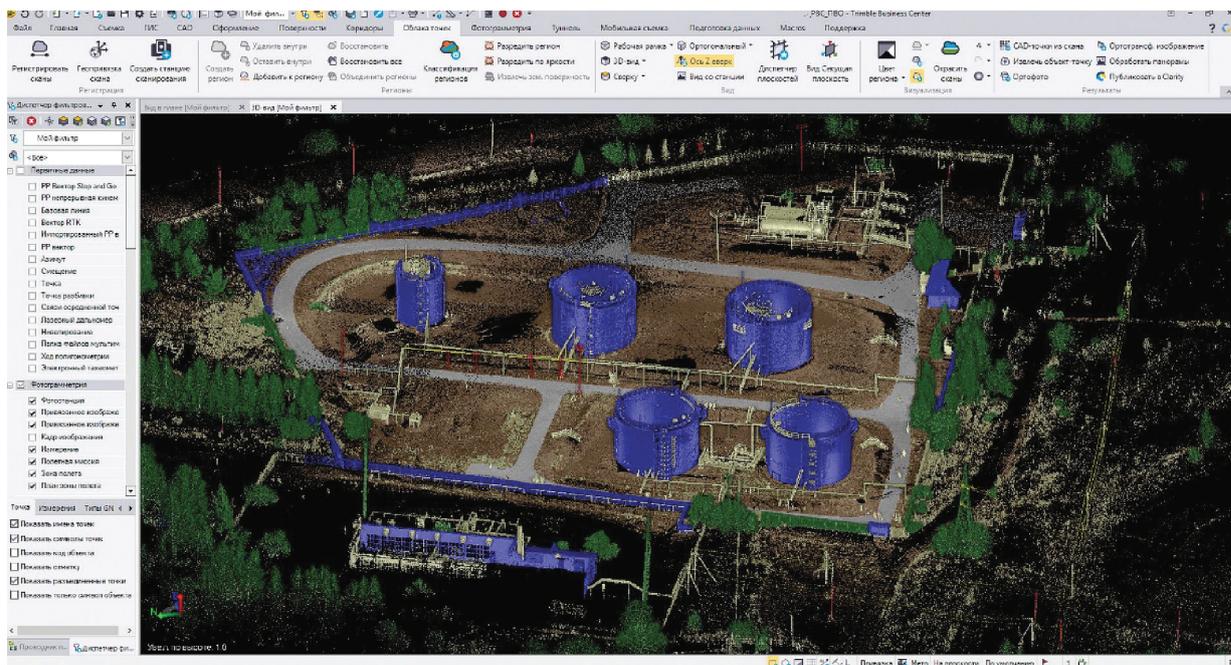


Рис. 1. Облака точек РВС в Trimble Business Center

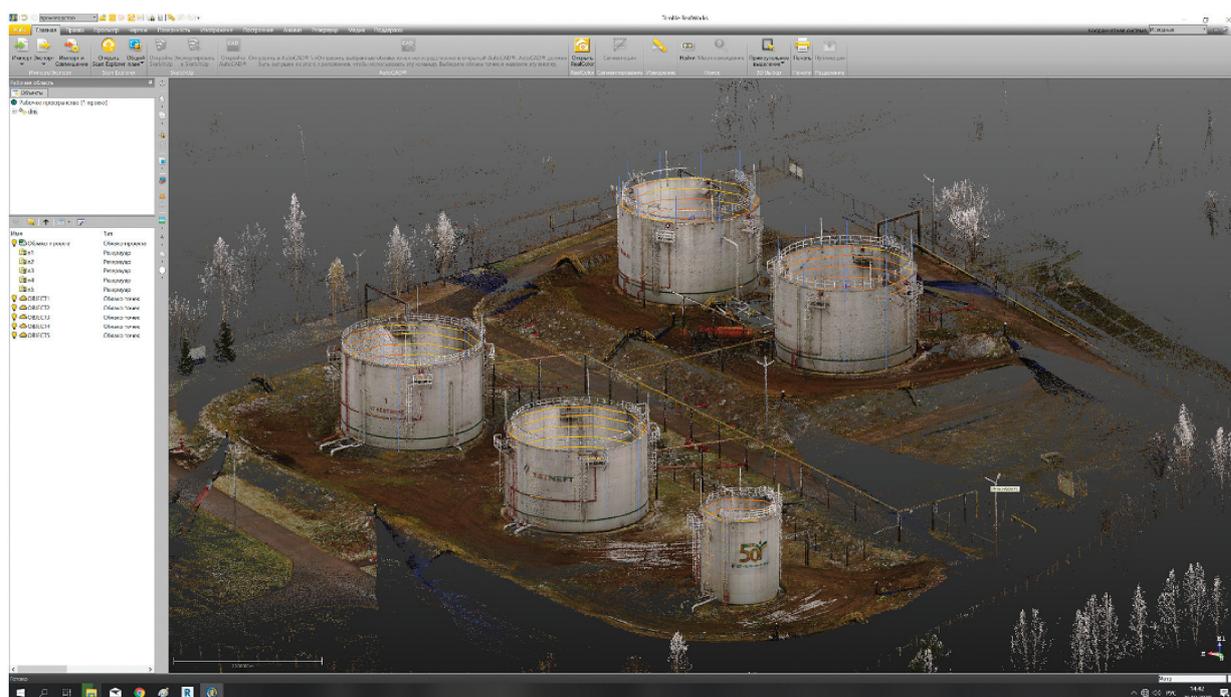


Рис. 2. Облака точек РВС в Trimble RealWorks Advanced-Tank Edition

– автоматическое разделение облаков точек (автоклассификация) на элементы:

- крыша РВС;
- стенки РВС (по ним выполняются измерения);
- технологическое оборудование (патрубки, люки, трубы, лестницы);
- фундамент РВС (днище).

Далее указываются верхний и нижний уровни стенки РВС (рис. 4).

Затем автоматически строятся вертикальные образующие стенки РВС вертикальной секущей линией, исходящей из базовой точки, расположенной на окрайке днища, и определяются пояса резервуара (рис. 5).

После этого измеряются отклонения образующих стенки на определенных высотах от заданной вертикальной линии (рис. 6), построенной из базовой точки. Определяется смещение стенок относительно номинального положе-

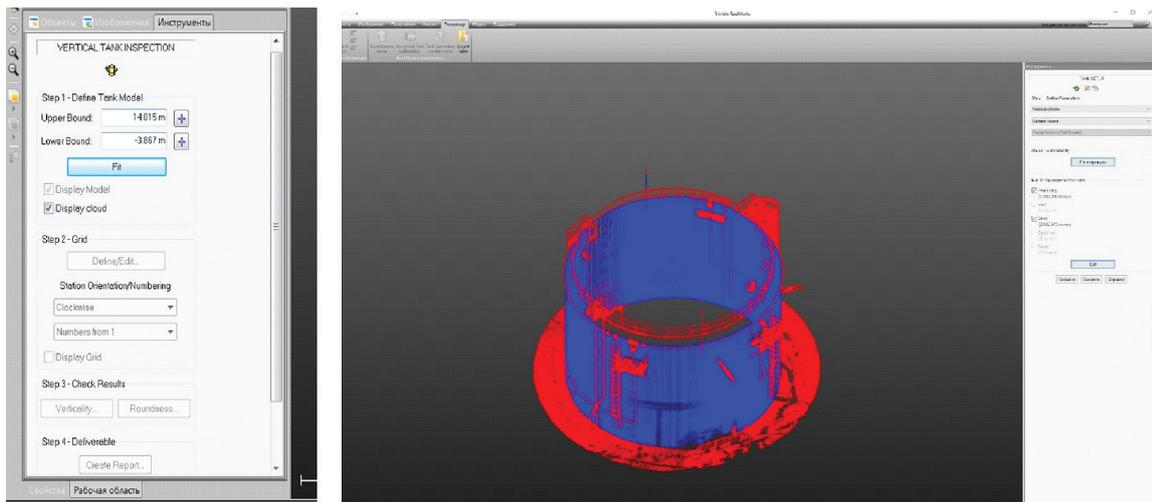


Рис. 3. Автоматическая классификация резервуара по облаку точек

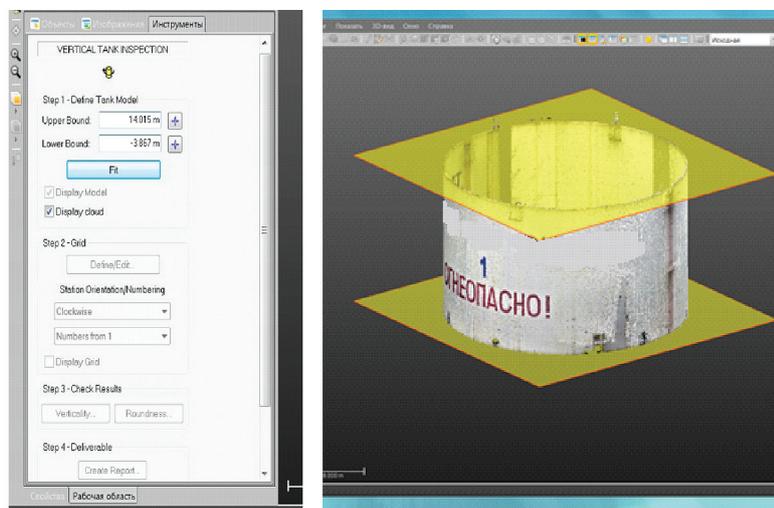


Рис. 4. Задание верхнего и нижнего уровней стенки РВС

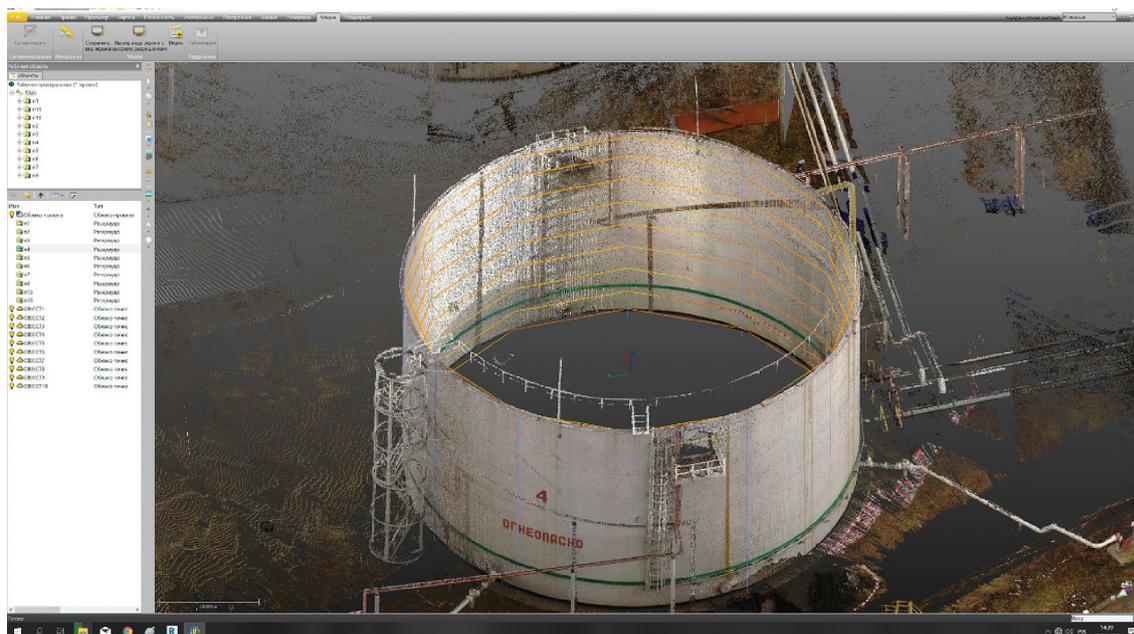


Рис. 5. Построение вертикальных образующих и определение поясов РВС

ния. Допуск устанавливается в нормативно-технических и руководящих документах.

Если значение не в допуске, то программа сообщает об этом и дальнейшая оценка количественных и качественных характеристик деформаций (вмятин или выпуклостей) производится по напряженно-деформированной модели (рис. 7). Все измерения проводятся в автоматическом режиме. При этом присутствует возможность проведения ручного контроля измерений.

На последнем этапе формируется стандартизированный отчет по каждой образующей и каждому поясу резервуара (рис. 8), представленный в отчете объем информации соответствует требованиям российских РД и международному стандарту API 653. В отчете отображаются:

- базовая информация по резервуару;
- таблицы отклонений: фактическое значение и определение допуск/недопуск (в соответствии с РД);
- графическая информация.

Для выявления предельных деформационных характеристик РВС, при которых возможна безопасная эксплуатация, необходимо использовать максимально точную модель сооружения, конструкция которого будет полностью соответствовать реальным параметрам. Возможности лазерного сканирования и обработка данных в Trimble RealWorks Advanced – Tank Edition позволили получить максимальную качественную и количественную информацию по геометрии резервуара, отвечающую всем необходимым требованиям к исходным данным для расчета напря-

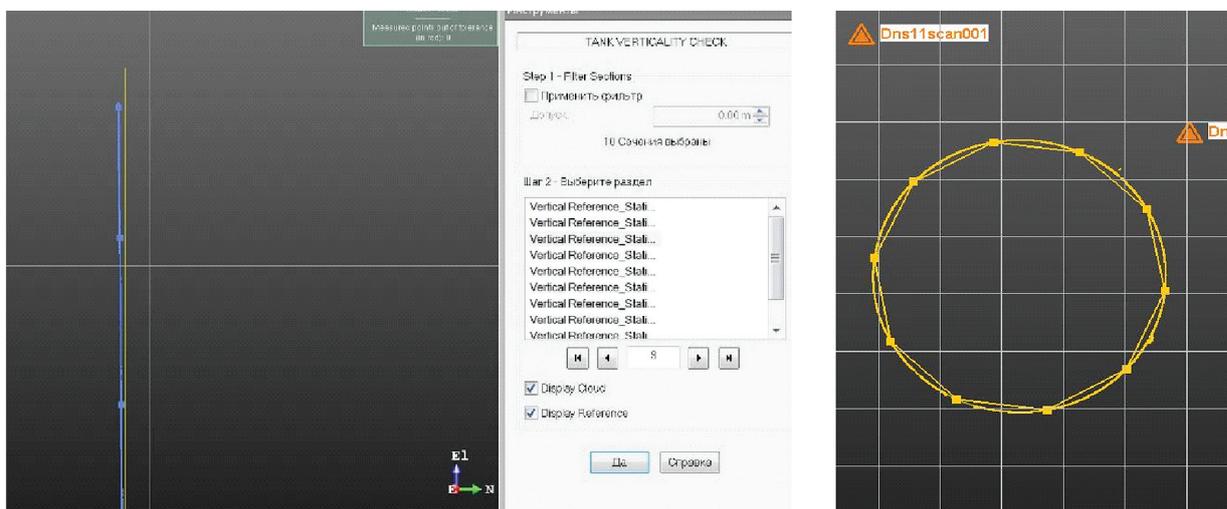


Рис. 6. Контроль измерений отклонений образующих стенки

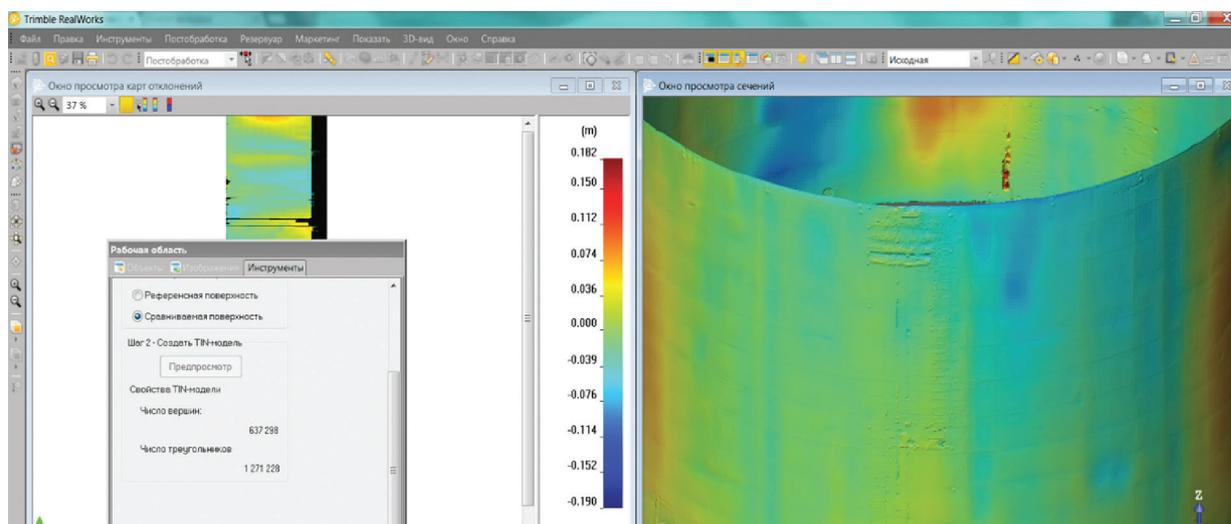


Рис. 7. Оценка деформаций РВС

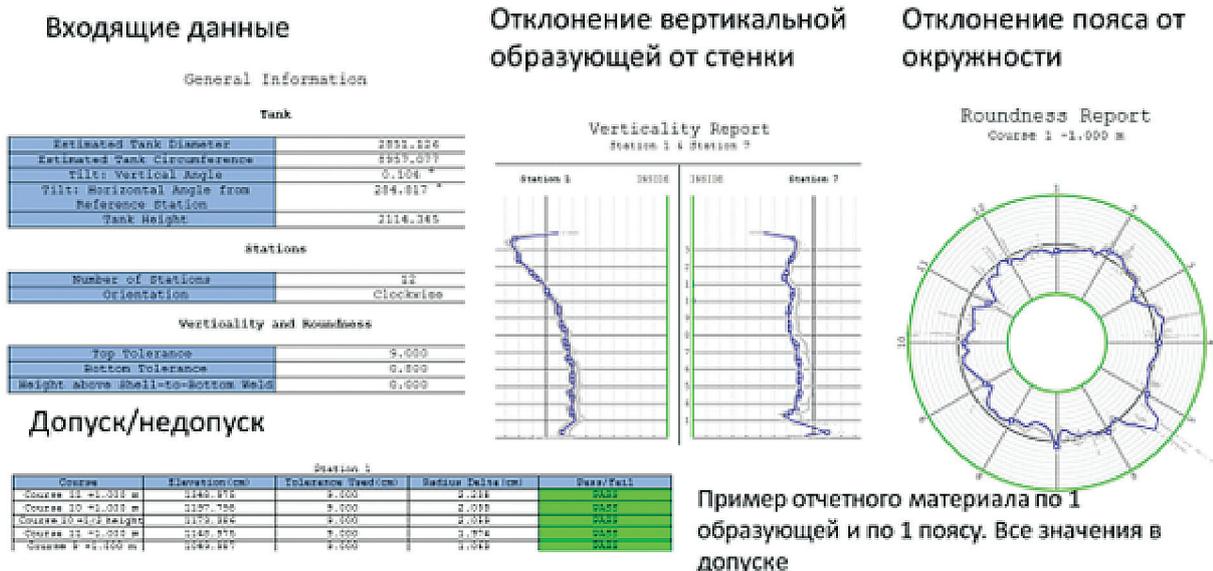


Рис. 8. Пример отчетного материала

женно-деформированного состояния в стороннем специализированном программном обеспечении.

Работы по нивелированию с применением Trimble DiNi u Trimble SX10

В рамках проекта мониторинга резервуарного парка в ПАО «Татнефть» было выполнено нивелирование II класса грунтовых реперов цифровым нивелиром Trimble DiNi 0.3. Определение высотного положения деформационных марок для измерения осадок производится методом высокоточного тригонометрического нивелирования от пунктов созданной опорной маркшейдерской сети с использованием высокоточных тахеометров, применяемых в системе контроля геометрических параметров различных инженерных сооружений и конструкций. Координирование производится полярным методом, после завершения наблюдений на станции выполняется контрольное наведение на опорную точку.

Технические характеристики Trimble SX10 обеспечивают определение высот с точностью не ниже IV класса нивелирования, плановых координат с точностью до 1–2 мм.

Технические характеристики Trimble SX10 удовлетворяют требованиям Постановления Правительства РФ от 16 ноября 2020 года № 1847 «Об утверждении перечня измерений, относящихся к сфере государственного регулирования обеспечения единства изме-

рений». Согласно п 8.7 измерения, производимые лазерным сканером, входят в перечень измерений, относящихся к сфере государственного регулирования обеспечения единства измерений [7].

Определение высотного положения наблюдательных марок производится методом проложения тригонометрического нивелирного хода, отвечающего требованиям IV класса от заложенных грунтовых реперов.

Было выполнено сравнение отметок осадочных марок днища РВС, полученных методом геометрического нивелирования, выполненных цифровым нивелиром Trimble DiNi 0.3, и измерений методом тригонометрического нивелирования, выполненных сканирующим тахеометром Trimble SX10 (табл. 1).

Можно сделать следующий вывод: полученные значения отклонений двух методов не превышают требований IV класса нивелирования и имеют высокую степень достоверности.

Заключение

Применяемые аппаратные и программные средства Trimble позволили существенно автоматизировать процесс инспекции РВС и получение необходимых отчетов о его состоянии. При этом были исключены риски возникновения ошибок при измерениях и обработке данных. В табл. 2 и 3 приведена сравнительная оценка эффективности методов лазерного сканирования на примере выполнения работ по мониторингу деформаций пяти РВС.

Таблица 1

Сравнение отметок осадочных марок дннца РВС

№ марки	Значения отметок, м. Trimble Dini 0.3	Значения отметок, м. Trimble SX-10	Разница отметок между Trimble Dini и Trimble SX-10, мм	№ марки	Значения отметок, м. Trimble Dini 0.3	Значения отметок, м. Trimble SX-10	Разница отметок между Trimble Dini и Trimble SX-10, мм
3-1	170,403	170,404	-1	4-1	173,767	173,764	3
3-2	170,369	170,371	-2	4-2	173,771	173,771	0
3-3	170,341	170,343	-2	4-3	173,776	173,776	0
3-4	170,336	170,336	0	4-4	173,777	173,778	-1
3-5	170,35	170,350	0	4-5	173,764	173,762	2
3-6	170,367	170,369	-2	4-6	173,756	173,755	1
2-1	170,254	170,252	2	4-7	173,753	173,753	0
2-2	170,253	170,253	0	4-8	173,753	173,752	1
2-3	170,221	170,221	0	4-9	173,758	173,757	1
2-4	170,179	170,177	2	4-10	173,76	173,759	1
2-5	170,144	170,143	1	5-1	173,791	173,792	-1
2-6	170,137	170,138	-1	5-3	173,807	173,804	3
2-7	170,152	170,152	0	5-4	173,803	173,801	2
2-8	170,193	170,191	2	5-5	173,776	173,773	3
2-9	170,232	170,232	0	5-6	173,752	173,750	2
2-10	170,263	170,262	1	5-7	173,742	173,740	2
				5-8	173,734	173,731	3
				5-9	173,741	173,744	-3
				5-10	173,758	173,756	2

Таблица 2

Сравнение методов работы

	Роботизированный тахеометр Trimble SX10	Классический метод (измерения тахеометром и нивелирование)
Время полевых работ	4 часа	8 часов
Время камеральных работ	1 час	8 часов
Определение отклонений вертикальных образующих	Есть	Есть
Определение отметок осадочных марок	Есть (кроме II класса)	Есть
Автоматизация полевых работ	Сканирование	Ручные измерения
Автоматизация камеральных работ	Автоматическое создание отчёта	Расчеты в AutoCAD и Excel

Таблица 3

Оценка эффективности работ

ТЭП	РВС, количество	Срок, дней	Вид работ	Количество людей
Лазерный сканер	50	5	Сканирование	1
SX-10	35	5	Сканирование Нивелирование IV класс	2
Цифровой нивелир	30	5	Нивелирование IV класс Нивелирование II класс	3
Цифровой нивелир	50	5	Нивелирование II класс	3
Камеральная обработка.	50	2	Нивелирование	1
Камеральная обработка.	50	2	Сканирование	1
Составление отчетов*				

Используемые в работе технологии позволили повысить скорость и качество работ по мониторингу деформаций РВС, при этом экономическая эффективность от сокращения совокупных затрат на работы составляет до 20%. Результатом применения данных технологий в том числе является создание высокоточных цифровых моде-

лей объектов нефтегазового комплекса, что важно для дальнейшего продвижения технологий информационного моделирования.

Работы проводились в соответствии с нормативно-техническими документами, регламентирующими диагностику резервуаров.

БИБЛИОГРАФИЧЕСКИЙ СПИСОК

1. Федеральный закон от 21.07.1997 № 116-ФЗ (ред. от 29.07.2018) «О промышленной безопасности опасных производственных объектов».
2. РД 08-95-95 Положение о системе технического диагностирования сварных вертикальных цилиндрических резервуаров для нефти и нефтепродуктов.
3. ГОСТ 24846-2019 Грунты. Методы измерения деформаций оснований зданий и сооружений.
4. СП 22.13330.2016. Основания зданий и сооружений (актуализированная редакция СНиП 2.02.01-83).
5. СП 126.13330.2017. Свод правил. Геодезические работы в строительстве. (актуализированная редакция СНиП 3.01.03-84).
6. Технический проект: Комплекс работ по наблюдению за осадками и деформациями РВС.
7. Постановление Правительства РФ от 16 ноября 2020 года № 1847 «Об утверждении перечня измерений, относящихся к сфере государственного регулирования обеспечения единства измерений».

REFERENCES

1. Federal Law of 21.07.1997 N 116-FZ (as amended on 29.07.2018) «On industrial safety of hazardous production facilities».
2. RD 08-95-95 Regulations on the system of technical diagnostics of welded vertical cylindrical tanks for oil and oil products.
3. GOST 24846-2019 Soils. Methods for measuring deformations of the foundations of buildings and structures.
4. SP 22.13330.2016. Foundations of buildings and structures (updated edition of SNiP 2.02.01-83).
5. SP 126.13330.2017. Set of rules. Geodetic works in construction (updated edition of SNiP 3.01.03-84).
6. Technical design: Complex of works on monitoring of sediments and deformations of vertical steel tanks.
7. Decree of the Government of the Russian Federation of November 16, 2020 No. 1847 «On approval of the list of measurements related to the sphere of state regulation of ensuring the uniformity of measurements.»

Серков Владимир Валерьевич, генеральный директор, ООО «Сканинг»,
тел. +7 (917) 877- 66-23, e-mail: v.serkov@laserscanningeng.ru;

Резванов Дамир Хайдарович, менеджер по работе с ключевыми заказчиками,
ООО «Тримбл Рус» (Trimble Inc.), тел. +7 (985) 722-85-21, e-mail: Damir_rezvanov@trimble.com;

Гилаев Дамир Мунзилович, начальник отдела топографо-геодезических и маркшейдерских работ – заместитель начальника УТГИМР СП «Татнефть-Добыча», ПАО «Татнефть»,
тел.: +7 (917) 241-47-26, e-mail: GilaevDM@tatneft.ru;

Загреддинов Айдар Анисович, аспирант, ФГАОУ ВО «Казанский (Приволжский) федеральный университет», тел. +7 (987) 214-44-86, e-mail: zagretdinov.aidar.91@yandex.ru

Serkov Vladimir Valerievich, General Director, Scanning LLC, tel. +7 (917) 877-66-23,
e-mail: v.serkov@laserscanningeng.ru;

Rezvanov Damir Khaidarovich, Key Account Manager, Trimble Inc., tel. +7 (985) 722-85-21,
e-mail: Damir_rezvanov@trimble.com;

Gilaev Damir Munzilovich, Head of the Department of Topographic, Geodetic and Mine Surveying Works – Deputy Head of UTGIMR JV Tatneft-Dobycha, PJSC Tatneft, tel.: +7 (917) 241-47-26,
e-mail: GilaevDM @ tatneft. ru;

Zagretdinov Aydar Anisovich, Postgraduate Student, Kazan (Volga Region) Federal University,
tel. +7 (987) 214-44-86, e-mail: zagretdinov.aidar.91@yandex.ru

ОПЫТ И ПЕРСПЕКТИВЫ ИСПОЛЬЗОВАНИЯ РАДАРНОЙ СЪЕМКИ ДЛЯ ГЕОДИНАМИЧЕСКОГО МОНИТОРИНГА НЕФТЯНЫХ МЕСТОРОЖДЕНИЙ

В нефтегазовой сфере радарная интерферометрия зарекомендовала себя как эффективный инструмент для мониторинга движения поверхности Земли, способный охватывать большие площади при низких затратах и в пространственных масштабах, недостижимых при традиционных методах измерения. Выявление движения поверхности Земли на территории месторождения в целом может снизить риск потенциальной реактивации зоны разлома с соответствующим повреждением и утратой объектов инфраструктуры. В статье представлен опыт использования радарной интерферометрии на территории нефтегазового месторождения для определения скоростей смещения земной поверхности.

Ключевые слова: радарная интерферометрия; LOS; метод PSI.

L. I. Bulatova, D. M. Gilaev, R. R. Nazarov

EXPERIENCE AND PROSPECTS OF USING RADAR IMAGERY FOR GEODYNAMIC MONITORING OF OIL FIELDS

In the oil and gas industry, radar interferometry has proven to be an effective tool for monitoring the displacement of the ground surface, capable of covering large areas at low cost and at spatial scales unattainable with traditional measurement methods. Detection of ground surface movement in the field, definitely, can reduce the risk of potential reactivation of the fault zone with the corresponding damage and loss of infrastructure. The experience of using radar interferometry on the territory of an oil and gas field to determine the velocity of displacement of the earth's surface is presented below.

Keywords: radar interferometry; LOS; PSI method.

Одно из первых масштабных исследований с применением спутниковой радарной интерферометрии на нефтяном месторождении было проведено в конце XX века специалистами Калифорнийского технологического института г. Пасадена США [1]. Авторы исследования зафиксировали быстрорастущие оседания методом парной интерферометрии на основе данных спутников European Space Agency Remote Sensing Satellites (ERS-1 and ERS-2). Полученные результаты сравнивались с результатами моделирования упругих деформаций для нефтяного месторождения. Моделирование показало, что изменение объема на глубине достаточно для того, чтобы вызвать амплитуды деформаций, полученные методом радарной интерферометрии.

К важным выводам пришли исследователи из Республики Казахстан при проведении космического радарного мониторинга смещений земной поверхности на одном из нефтяных месторождений Мангистауской области [2]. Мониторинг смещений был выполнен с использованием данных радарных съемок территории месторождения со спутника ALOS/PALSAR (JAXA, Япония). Проанализировав динамику смещений земной поверхности на месторождении за 2007–2011 годы и сопоставив основные выявленные очаги смещений земной поверхности на месторождении с пространственным местоположением реперов наземного нивелирования и дифференциальных ГНСС-станций, авторы сделали вывод, что значительная часть выявленных по радарным данным локальных

очагов наиболее интенсивных оседаний и поднятий расположена между профилями нивелирования – там, где наземные наблюдения не проводятся. В пределах некоторых очагов смещений находятся ГНСС-станции, но их расположение слишком неравномерно и не позволяет построить столь неоднородную карту смещений, выявленных по радарным данным. Вышеприведенные факты наглядно демонстрируют необходимость применения дистанционных (космических радарных) площадных методов мониторинга смещений земной поверхности в дополнение к традиционным наземным методам для получения полной картины происходящих смещений.

Из отечественного опыта применения метода радарной интерферометрии для определения смещения земной поверхности на нефтегазовых месторождениях следует отметить работу, выполненную исследователями А. В. Евтюшкиным и А. В. Филатовым [3]. Интерферометрическая обработка проводилась по радарным снимкам спутника ALOS/PALSAR. После совместного анализа результатов интерферометрической обработки радарных данных и материалов высокоточной геодезической съемки на территории Самотлорского геодинамического полигона авторами было сделано заключение: для областей с низкой растительностью, которая является прозрачной для зондирующего сигнала L-диапазона, расчетные смещения в большей степени соответствуют подвижкам блоков земной коры. Отрицательные смещения в основном соответствуют зоне торфяных болот с низкой растительностью. Использование результатов радиолокационной съемки в одни и те же месяцы разных лет позволяет минимизировать влияние сезонных изменений уровня торфяных болот.

Большая комплексная работа по совместному анализу данных геодезического мониторинга и данных радарной интерферометрии была выполнена группой сотрудников Западно-Сибирского филиала Института нефтегазовой геологии и геофизики им. А. А. Трофимука СО РАН (г. Тюмень) и Балтийского федерального университета имени Иммануила Канта (г. Калининград) на Комсомольском нефтегазоконденсатном месторождении [4]. В качестве данных дистанционного

зондирования использованы данные радарной съемки с европейских спутников Sentinel-1A, Sentinel-В среднего пространственного разрешения. По результатам интерферометрической обработки снимков в юго-восточной части Комсомольского месторождения подтверждена локальная зона оседания земной поверхности с максимальной величиной до –250 мм, ранее выявленная нивелированием II класса. Кроме того, инструментальными геодезическими наблюдениями и радарной интерферометрией по космическим снимкам Sentinel-1A, Sentinel-В выявлена и подтверждена локальная зона геодинамического риска, где по изолинии –320 мм располагаются основные технологические объекты газового и нефтегазового Комсомольского промысла.

Интерес к спутниковой радарной интерферометрии непрерывно растет. Данный метод уже успел стать еще одним эффективным видом мониторинга геодинамических процессов, который вошел в практику маркшейдерских работ.

Основное преимущество радарной интерферометрии, которое сделало популярным данный метод, – съемка ведется регулярно (с интервалом от 5–6 дней до месяца) в любое время суток независимо от освещенности и погодных условий. Для решения задач космического радарного мониторинга смещений и деформаций земной поверхности и сооружений применяется технология интерферометрической обработки PSI (Persistent Scatterers Interferometry – интерферометрия устойчивых отражателей радарного сигнала). Метод устойчивых отражателей основан на том, что многие (особенно техногенные) объекты характеризуются достаточным постоянством характера обратного рассеяния, которое прослеживается на длинных временных рядах парных интерферограмм. Метод PSI использует фазовую стабильность как критерий выбора устойчивого отражателя, что позволяет уверенно идентифицировать устойчивые отражатели на природных объектах [5]. Данный метод позволяет фильтровать высокочастотные по времени помехи, меняющиеся от снимка к снимку, что существенно подавляет не только аппаратные шумы, но и атмосферные, и орбитальные погрешности. При благоприятных условиях

Таблица 1

Сравнение результатов высокоточного нивелирования и метода PSI

Номер репера	Δh (2017–2019), мм	LOS, мм/года	Расстояние до ближайшего устойчивого отражателя, м	Δ , мм
1	-2	-1.4	7.59	1
2	0	0.5	7.05	1
5	-2	-1.4	12.49	1
6	-2	-1.2	3.71	1
06	-1	0.6	9.25	2
7	-1	-0.2	7.62	1
8	-1	-0.2	8.82	1
9	-1	-1	7.52	0
10	-1	-1.8	7.58	1
11	0	-1.6	3.82	2
12	-1	-0.7	5.61	0
13	-2	0.4	5.14	2
0013	-2	-1.3	8	1
14	-1	-0.6	14.28	0
0014	-1	-0.6	18.96	0
015	-4	-3.2	26.12	1
0015	-2	-0.7	26.28	1
016	-3	-2.4	21.15	1
0016	-2	0.7	10.44	3

ченных результатов для каждого репера был выбран ближайший (имеющий минимальное расстояние до репера) устойчивый отражатель. Для всех реперов нивелирной сети была проделана процедура выбора ближайшего устойчивого отражателя. Значение смещения в направлении визирования LOS спутника устойчивого отражателя считалось смещением соответствующего репера. В табл. 1 для малой части представлена разность высот реперов Δh по результатам нивелирования за период 2017-2019 годов, значение смещения репера LOS по данным радарной интерферометрии за тот же период, расстояние в метрах

до ближайшего устойчивого отражателя и разность Δ значений двух методов.

Проанализировав совпадение и различие знаков значений Δh и LOS для всего перечня реперов, было определено, что из 123 реперов знаки совпали у 89, что составляет 72 % от общего количества, и, следовательно, для 34 реперов (28 % от общего количества) знаки оказались различны. Также было рассчитано среднее значение отклонения результатов нивелирования от данных, полученных методом радарной интерферометрии. Среднее значение отклонения составило 2 мм.

На основе полученных выше результатов: совпадение знаков – на 72 %, среднее значение отклонения – 2 мм, резюмируем – данные, полученные двумя методами, согласуются между собой.

Второе исследование было проведено на территории Ашальчинского геодинамического полигона. Площадь выбранного участка составила 420 км². Для данной территории были получены в общей сложности 12633 постоянных отражателя. Диапазон общей (кумулятивной) скорости изменения за весь период составил от -8 мм/года до +8 мм/года. Средняя годовичная скорость смещения изменяется от -3 мм/год до +3 мм/год. Плотность устойчивых отражателей (рис. 2) в среднем для незастроенной области составила 5 устойчивых отражателей на 1 км² и 470 отражателей на 1 км² для застроенной области.

Так как на участке установлено 25 спутниковых референсных базовых станций сети ПАО «Татнефть», оказалось возможным провести сопоставление изменения высоты станции и зарегистрированного значения вертикального смещения постоянного отражателя, находящегося в непосредственной близости от базовой станции. Таким образом, базовые референсные станции являются своеобразными высотными реперами, которые будут использоваться для подтверждения данных, полученных технологией PSI.

На первом этапе, по данным спутниковых измерений, были отобраны станции без резких изменений вертикальной компоненты. На следующем этапе станции отбирались по критерию наличия достаточного числа устойчивых отражателей в заданном радиусе, в нашем случае величина радиуса составила

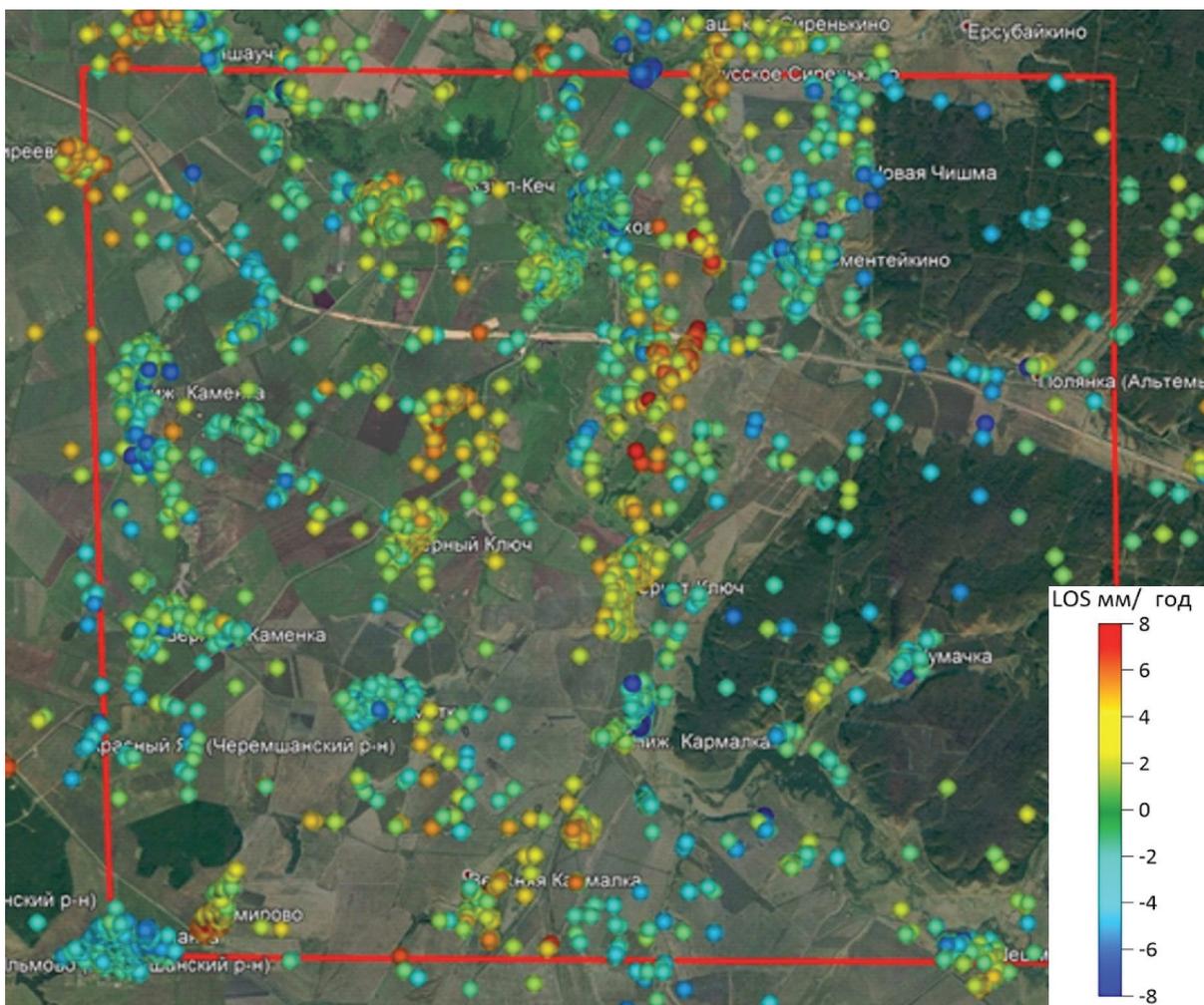


Рис. 2. Граница территории участка (красный). Расположение устойчивых отражателей на территории Ашалчинского геодинамического полигона

Таблица 2

Сравнение результатов ГНСС измерений и метода PSI

	3199	SAH1	3204	1500	NKR3	NKR2	GZU1
GNSS	1,4	-1,1	-0,2	2,1	-2,5	-4,2	-4,9
PSI	0,7	-0,4	1,5	-0,4	0,4	-0,5	-0,1
Δ, мм/год	0,7	0,7	1,7	2,5	2,9	3,7	4,8

300 м. Для определения величины вертикального смещения, которое принималось как вертикальное смещение выбранной станции, проводился расчет этого смещения методом обратных расстояний по ближайшим устойчивым отражателям в определенном радиусе выбора. Таким образом, было получено расчетное значение вертикального смещения для каждой из станций. В табл. 2 представлены значения вертикальных смещений, полученные по ГНСС-измерениям (GNSS, мм/год) и методом радарной интерферометрии

(PSI, мм/год), а также разница смещений по этим двум методам (Δ, мм/год).

Полученные данные свидетельствуют о сопоставимых значениях смещений, что позволяет уверенно рекомендовать PSI-метод для получения значений смещения земной поверхности на значительных площадных незастроенных объектах.

В результате проведенных работ можно сделать следующее заключение. Полученные значения деформаций земной поверхности при использовании дифференциаль-

ной спутниковой интерферометрии (метод устойчивых отражателей) в случае обработки больших наборов радарных снимков (более 30) соответствуют данным геометрического нивелирования и ГНСС-измерений. Это подтверждается проведенным сравнением результатов спутниковой интерферометрии и геометрического нивелирования 2-го класса на территории г. Альметьевск и в его окрестностях, и геодезических измерений на Ашальчинском ГДП (ГНСС-измерения). Сопоставление результатов в обоих случаях показало, что среднее отклонение между двумя методами не превышает 3 мм. Для рассматриваемой территории исследования точность

получения смещений методом радарной интерферометрии составила 4 мм. Данная точность получаемых смещений позволяет однозначно выявлять геодинамические явления на исследуемой территории и удовлетворяет требованиям существующих нормативных документов.

Проведенное исследование планируется проводить в ежегодном режиме, постепенно расширяя исследуемые участки для того, чтобы охватить всю деятельность ПАО «Татнефть». Результаты радарной интерферометрии также будут сравниваться с данными высокоточного нивелирования и с ГНСС-измерениями.

БИБЛИОГРАФИЧЕСКИЙ СПИСОК

1. *Fielding E. J., Blom R. G., Goldstein R. M.* Rapid subsidence over oil fields measured by SAR interferometry // *Geophys. Res. Lett.* 1998. 25. P. 3215–3218.
2. *Кантемиров Ю. И., Камза А. Т., Бермуханова А. М., Тогайбеков А. Ж., Сапарбекова М. А., Никифоров С. Э.* Космический радарный мониторинг смещений земной поверхности на примере одного из нефтяных месторождений Мангистауской области Республики Казахстан // *Геоматика.* 2014. № 4. С. 46–58.
3. *Евтюшкин А. В., Филатов А. В.* Мониторинг просядок земной поверхности на нефтегазовых месторождениях методом радарной интерферометрии. Интерэкспо Гео-Сибирь, 2010.
4. *Васильев Ю. В., Мисюрев Д. А., Филатов А. В.* Технологическое влияние разработки комсомольского месторождения на современные деформационные процессы // *Известия высших учебных заведений. Нефть и газ.* 2018. № 2 (128).
5. *Hooper A., Zebker H., Segall P., Kampes B.* A new method for measuring deformation on volcanoes and other natural terrains using InSAR persistent scatterers // *Geophysical Research Letters.* 2004. Vol. 31.

REFERENCES

1. *Fielding E. J., Blom R. G., Goldstein R. M.* Rapid subsidence over oil fields measured by SAR interferometry. *Geophys. Res. Lett.* 1998. 25. pp. 3215–3218.
2. *Kantemirov Y. I., Kamza A. T., Ermuhanova A. M., Toybekov A. J., Saparbekova M. A., Nikiforov S. E.* Space radar monitoring of surface displacements on the example of one of the oil fields of the Mangystau region of the Republic of Kazakhstan. *Geomatics.* 2014. № 4. pp. 46–58.
3. *Evtuyshkin A. V., Filatov A. V.* *Monitoring of subsidence of the earth's surface in oil and gas fields by the method of radar interferometry.* Interexpo Geo-Siberia, 2010.
4. *Vasiliev Yu. V., Misyurev D. A., Filatov A. V.* Technogenic influence of the Komsomolskoye field development on modern deformation processes. *News of higher educational institutions. Oil and gas.* 2018. № 2 (128).
5. *Hooper A., Zebker H., Segall P., Kampes B.* A new method for measuring deformation on volcanoes and other natural terrains using InSAR persistent scatterers. *Geophysical Research Letters.* 2004. Vol. 31.

Булатова Луиза Ирековна, инженер-геодезист, ООО «Эридан», тел. +7 (987) 279-89-94, e-mail: louisa3481@gmail.com;

Гилаев Дамир Мунзилович, начальник отдела топографо-геодезических и маркшейдерских работ, ПАО «Татнефть», тел. +7 (917) 241-47-26, e-mail: gilaevdm@tatneft.ru;

Назаров Рафик Рахимович, директор компании, ООО «Эридан», тел. +7 (966) 260-36-33, e-mail: eridangeo@yandex.ru

Bulatova Louisa Irekovna, Engineer-Surveyor, «Eridan» LLC, tel. +7 (987) 279-89-94, e-mail: louisa3481@gmail.com ;

Gilaev Damir Munzilovich, Head of The Department of Topographic and Geodetic And Mine Surveying Works, Tatneft PJSC, tel. +7 (917) 241-47-26, e-mail: gilaevdm@tatneft.ru;

Nazarov Rafik Rakhimovich, Director of The Company, «Eridan» LLC, tel. +7 (966) 260-36-33, e-mail: eridangeo@yandex.ru