

# СПУТНИКОВЫЙ МОНИТОРИНГ ДЕФОРМАЦИЙ МОРСКОЙ ЛЕДОСТОЙКОЙ СТАЦИОНАРНОЙ ПЛАТФОРМЫ

**О.Н. Горбунов** («ЛУКОЙЛ-Нижневолжскнефть»)

В 1990 г. окончил гидрографический факультет Высшего военно-морского училища им. М.В. Фрунзе (в настоящее время — Морской корпус Петра Великого — Санкт-Петербургский военно-морской институт) по специальности «инженер-гидрограф», в 2012 г. — факультет дистанционного и дополнительного обучения Южно-Российского государственного университета (Новочеркасский политехнический институт) по специальности «маркшейдерское дело». С 1990 г. проходил службу в частях и подразделениях Гидрографической службы Каспийской флотилии. С 2004 г. работает в ООО «ЛУКОЙЛ-Нижневолжскнефть», в настоящее время — ведущий инженер-гидрограф отдела главного маркшейдера.

Морская ледостойкая стационарная платформа (ЛСП) на месторождении им. Ю. Корчагина установлена в северной части Каспийского моря, на глубине 11,3 м, в 110 км от берега (рис. 1). Она состоит из производственного (ЛСП-1) и жилого (ЛСП-2) блоков, соединенных переходным мостом.

ЛСП-1 предназначена для круглогодичного бурения эксплуатационных скважин, транспортировки нефти и газа по морскому подводному трубопроводу на пункты отгрузки с оперативным учетом отгружен-

ной продукции. Платформа является опасным и технически сложным инженерным сооружением, которое подвержено постоянному воздействию статических и динамических нагрузок, вызванных собственным весом, давлением воды и грунта, а также внешних условий, в которых она эксплуатируется (рис. 2). При произвольном пространственном воздействии нагрузок на платформу возникают деформации конструкций на изгиб, сдвиг и кручение, которые могут стать причиной повреждений ее элементов и

коммуникаций, нарушения целостности конструкций, повлиять на работу оборудования.

Следовательно, при мониторинге платформы важно не только определять величины деформаций, но и проводить их оценку с целью определения допустимой степени повреждения конструкций для снижения вероятности аварий и обеспечения необходимого уровня безопасности. Мониторинг технического состояния ЛСП-1 должен выполняться в течение всего расчетного срока службы конструкций по программе, которую следует разрабатывать одновременно с проектной документацией [1].

Для наблюдения и оценки деформаций и осадок ЛСП-1 в течение всего срока ее эксплуатации в 2010 г. была смонтирована и введена в действие система спутникового мониторинга. Она состоит из трех спутниковых приемников геодезического класса Leica GRX1200 с антеннами Leica AR25, а также средств коммуникаций, вычислительной аппаратуры и программного обеспечения, которое в автоматическом режиме ведет сбор данных и осуществляет



**Рис. 1**  
Морская ледостойкая стационарная платформа на месторождении им. Ю. Корчагина



Рис. 2

Внешние условия, воздействующие на конструкции платформы при эксплуатации

оценку деформаций [2]. Приемники Leica GRX1200 установлены в контрольных точках на трех углах платформы (рис. 3). Система работает под управлением программного обеспечения Leica GNSS Spider, которое предназначено для обработки результатов измерений, выполненных в режиме RTK (Real Time Kinematic). Leica GNSS Spider позволяет автоматически вычислять координаты контрольных точек, а в сочетании с программным обеспечением Leica SpiderQC — определять взаимное положение контрольных точек в режимах реального времени и постобработки.

При создании системы спутникового мониторинга деформаций ставилась задача обеспечить непрерывное и автоматическое определение смещений антенн, установленных стационарно на платформе, в режиме реального времени [2]. Это позволило выполнять наблюдения в любое время суток и при любой погоде, регистрировать значительные кратковременные деформации. Спутниковые приемники, работающие в автоматическом режиме, без участия оператора, с заданной дискретностью одновременно вычисляют все три координаты контрольной точки. Кроме того, контрольные точки и исходные

пункты, координаты которых надежно определяются за счет необходимого количества избыточных измерений, образуют геодезическую сеть.

Деформации конструкций ЛСП-1 выражаются через линейные вертикальные и горизонтальные смещения контрольных точек. Спутниковый мониторинг позволяет контролировать пространственное положение и геометрию конструкций платформы.

Программное обеспечение Leica GNSS Spider в режиме реального времени, ежесекундно, автоматически, выполняет обработку «сырых» данных, поступающих с приемников, и определяет пространственные координаты контрольной точки с точностью до нескольких сантиметров. Смещения контрольных точек вычисляются относительно одной из точек, назначенной в качестве базовой. По каждой из контрольных точек относительно базовой точки программным путем осуществляется контроль целостности сети путем периодического расчета взаимного положения контрольных точек — высоты, планового положения и планово-высотного положения. Вычисленные величины смещений находятся в интервале  $\pm 50$ – $100$  мм. Однако наличие

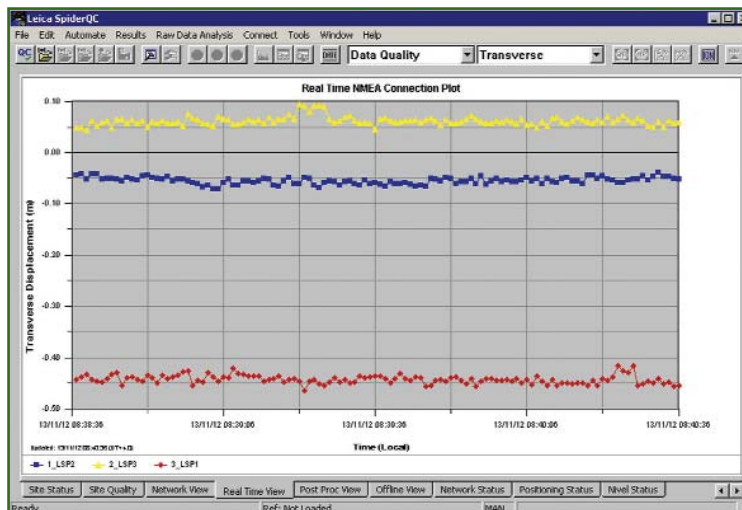


Рис. 3

Антенна Leica AR25, установленная на контрольной точке системы спутникового мониторинга деформаций ЛСП-1

возвышающихся конструктивных элементов платформы над антеннами, установленными на контрольных точках, вызывает помехи приема сигналов (многопутность). В связи с этим, погрешность измеренных смещений контрольных точек может превышать 400 мм.

Вычисленные значения координат контрольных точек отображаются в виде графиков смещений (рис. 4). На основании графиков смещений делается предварительная оценка стабильности местоположения контрольных точек на ЛСП-1, при условии, если тренд временного ряда определяется линией, близкой к прямой. В ре-



**Рис. 4**  
График вычисленных смещений контрольных точек с дискретностью в 1 секунду

зультате постобработки файлов за сутки предельная погрешность вычисления координат антенн составляет 50–70 мм. Для повышения точности и надежности координат антенн, определенных таким образом, используются файлы точных параметров орбит спутников ГНСС (эфемерид), которые предоставляются специализированными службами через сеть Интернет в формате SP3. После окончания обработки предельная погрешность вычисления координат составляет 30–50 мм. По разности этих координат оценивается величина смещений контрольных точек между циклами наблюдений.

Описанное выше программное обеспечение и алгоритмы не позволяют качественно обрабатывать базовые линии, длиной в несколько сотен или тысяч километров, с погрешностью в несколько миллиметров. Поэтому вычисленные значения горизонтальных и вертикальных смещений контрольных точек нельзя использовать для решения задач высокоточного мониторинга по определению величин пространственных деформаций и оценки целостности конструкций.

Для высокоточного определения деформаций платформы

с предельной погрешностью в несколько миллиметров компаниями НАВГЕОКОМ и Leica Geosystems (Швейцария) был предложен, а в 2012 г. реализован, тестовый проект мониторинга с использованием сервиса Leica CrossCheck.

Leica CrossCheck — это специализированный web-сервис высокоточного определения координат и мониторинга деформаций с использованием данных глобальных навигационных спутниковых систем. В нем используется программное обеспечение Bernese GPS Software 5.0 и алгоритмы обработки спутниковых данных для гарантированного получения высокоточных и надежных результатов

даже при сверхдлинных базовых линиях. Bernese GPS отвечает стандартам качества в области высокоточной спутниковой геодезии при обработке наблюдений ГНСС и широко применяется в научных исследованиях для вычисления координат, параметров орбит, изучения ионосферы, тропосферы, движения земной коры и определения множества других параметров. Данное программное обеспечение позволяет исключить ошибки и устранить неясность в обработке базовых линий, чем достигается высокая точность результатов.

Файлы спутниковых наблюдений с ЛСП-1 передавались на удаленный FTP-сервер Leica Geosystems в автоматическом режиме. Доступ к результатам спутникового мониторинга деформаций осуществляется через специальный Интернет-портал (рис. 5).

При обработке данных спутниковых наблюдений в сервисе Leica CrossCheck используется информация об уточненных элементах орбит спутников ГНСС и ориентации полюсов. Эта информация предоставляется службой IGS (International GNSS Service) в Международной земной системе отсчета ITRS (International Terrestrial Reference System), которая, начиная с 1988 г., имеет несколько практических реализаций в

Daily Solution									
Site Map (2D Vector)					Site Map (Height Vector)				
Status	Site Name	Site Code	Site Info	Solution Epoch	Δ Up	Δ North	Δ East	Results (1 Month)	Results (6 Months)
●	LSP1	LSP1 (A)	?	2012/08/11 13:59:45	-0.008	-0.000	-0.007		
●	LSP2	LSP2 (A)	?	2012/08/11 13:59:45	+0.006	-0.005	-0.004		
●	LSP3	LSP3 (A)	?	2012/08/11 13:59:45	-0.002	-0.002	-0.002		

Status	Meaning
●	Communication could not be established
○	Receiving no data or only status
●	Site is within tolerance
▲	Limit 1 has been exceeded
▲	Limit 2 has been exceeded
▲	Limit 3 has been exceeded

Last Modified: 3/08/12 08:35:11 (UT+2:0)  
This page was generated by CrossCheck 4.0.1.56.

**Рис. 5**  
Web-страница для просмотра данных спутникового мониторинга





**Рис. 6**  
Контрольные точки и исходные станции службы IGS

виде ITRF (International Terrestrial Reference Frame) — Международной земной отсчетной основы [3]. ITRF закреплена на земной поверхности опорными пунктами, которые, вследствие постоянного движения тектонических плит, регионального оседания почвы и т. п., смещаются. Все опорные пункты имеют скорость движения, которая зависит от скорости движения тектонической плиты, на которой они расположены. Поскольку ITRS задана как неподвижная система отсчета, служба IGS постоянно уточняет и относит к определенной временной эпохе координаты опорных пунктов. В результате сумма всех смещений опорных пунктов вследствие движения тектонических плит равняется нулю.

Параметры орбит спутников ГНСС и ориентация полюсов вычисляются постоянно действующими станциями службы IGS на опорных пунктах ITRF с использованием данных глобальных сетей, точных методов расчета и комбинированных решений различных исследовательских центров. Эфемериды доступны с задержкой в 12–18 дней и имеют высокую точность. Служба

IGS предоставляет эфемериды также и в кратчайшие сроки, но с менее высокой точностью. В сервисе Leica CrossCheck используется средняя эпоха наблюдений, гарантирующая согласованность между координатами станций и точными элементами орбит спутников.

Погрешности определения элементов приведения спутниковых антенн вызывают систематические ошибки, которые зависят от угла возвышения, азимута и частоты спутникового сигнала. Для учета положения фазового центра антенн в сервисе Leica CrossCheck используются средние параметры абсолютных калибровок антенн приемников в ITRF–2008.

Определение координат контрольных точек также выполнялось в ITRF–2008. Это обусловлено, во-первых, необходимостью применения координатной отсчетной основы, обеспечивающей высокую точность и единство измерений, а во-вторых, отсутствием установленных параметров связи с системой координат СК-95.

При обработке спутниковых наблюдений в качестве опорных пунктов использовались станции службы IGS (рис. 6),

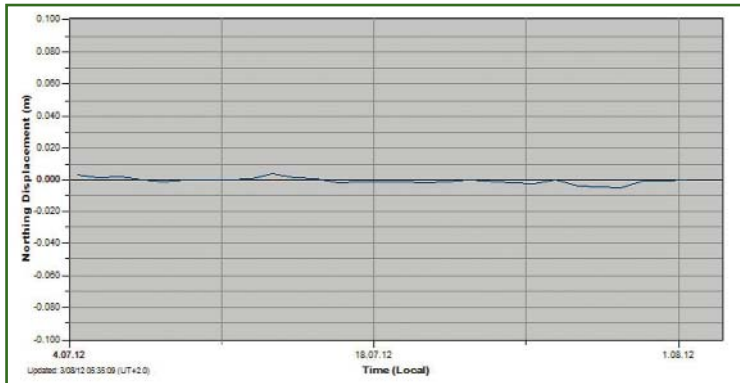
которые выбирались по следующим критериям:

- минимальное расстояние до ЛСП-1;
- известные координаты в ITRF–2008;
- постоянное наличие данных.

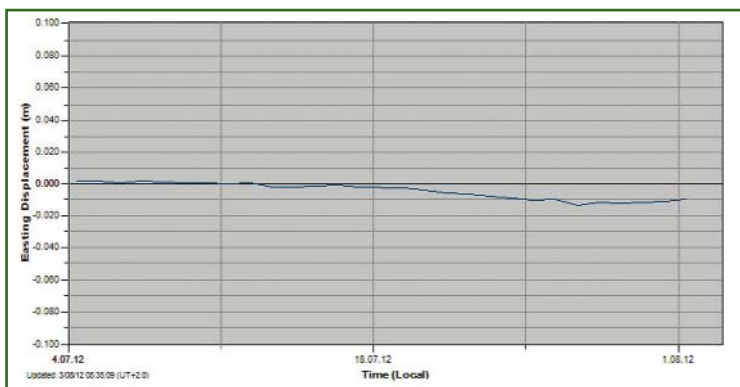
На первом этапе обработка данных включала вычисление фиксированных координат контрольных точек с использованием минимально ограниченного уравнивания по суточным/недельным файлам данных. Для разрешения неоднозначности координаты станций службы IGS жестко фиксировались. В обработку принимались базовые линии между станциями службы IGS и контрольными точками длиной до 5000 км. При обработке спутниковых измерений учитывалась модель тектонического движения земной коры для исключения влияния тектонических смещений на местоположение станций службы IGS и результаты мониторинга.

На следующих этапах в режиме постобработки вычислялись данные с интервалом в 1 час, полученные в течение суток. Смещение каждой контрольной точки оценивалось с вероятностью в 95%. Положение контрольных точек в плане (по оси X и Y) и по высоте (по оси H) отображалось в виде графиков смещений в течение всего времени наблюдений на специальном Интернет-портале (рис. 7–9). Доступ к результатам мониторинга предоставлялся по индивидуальному логину и паролю.

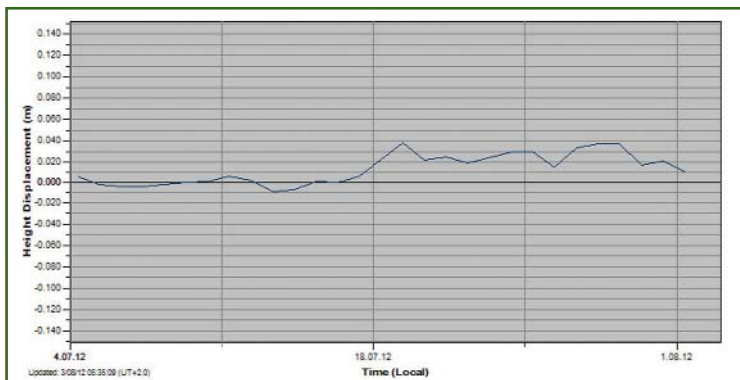
Результаты исследований подтвердили возможность использования сервиса Leica CrossCheck для мониторинга деформаций морской ледостойкой стационарной платформы. В данном случае решены задачи непрерывного и автоматического отслеживания состояния ЛСП-1 с целью предотвращения аварийных ситуаций. С помощью этого сервиса



**Рис. 7**  
Пример графика смещений по оси X



**Рис. 8**  
Пример графика смещений по оси Y



**Рис. 9**  
Пример графика смещений по оси H

вычислялись трехмерные координаты контрольных точек в определенный момент времени, позволяющие выявлять деформации конструкций — осадки, смещения, растяжения, сжатия и изгибы, которые могут возникнуть в связи с изменением геометрии конструкций или пространственного положения платформы.

Среди основных результатов разработки и внедрения системы спутникового мониторинга деформаций можно назвать следующие:

— мониторинг с помощью сервиса Leica CrossCheck показал достаточно высокую надежность и эффективность контроля деформаций и геометрии конструкций для обеспечения

безопасной эксплуатации морской ледостойкой стационарной платформы;

— система позволяет выявлять смещения контрольных точек с предельной погрешностью до 5 мм в трехмерном пространстве с вероятностью 95%;

— система функционировала как сервис, что позволило избежать сложной инсталляции и настройки программного обеспечения, обучения персонала и ее поддержки в работоспособном состоянии;

— мониторинг выполнялся круглосуточно в полностью автоматическом режиме.

Таким образом, система спутникового мониторинга с помощью сервиса Leica CrossCheck позволяет осуществлять контроль деформаций конструкций платформы, возникающих при воздействии сил и нагрузок, изменяющихся во времени по величине и направлению. Сравнение измеренных величин деформаций с установленными проектом предельными величинами дает возможность оценивать степень повреждения конструкций и определять техническое состояние платформы.

#### ▼ Список литературы

1. Руденко В.В., Каплин И.В., Каплин Е.И. Организация мониторинга морских нефтегазовых платформ // Безопасность труда в промышленности. — 2012. — № 9.
2. Горбунов О.Н. Организация системы геодинамического мониторинга на месторождении им. Ю. Корчагина // Маркшейдерский вестник. — 2011. — № 2.
3. Серапинас Б.Б. Глобальные системы навигации и позиционирования // Геопрофи. — 2010. — № 2. — С. 60–65.

#### RESUME

The article presents the main results of the test satellite monitoring for the sea-based ice resistant stationary platform using the Leica CrossCheck service.