

# НОВЫЙ СЕРВИС ВЫСОКОТОЧНОГО ПОЗИЦИОНИРОВАНИЯ G2 ДЛЯ GPS И ГЛОНАСС\*

**Т. Мелгард (Tor Melgard)** — Fugro Seastar, Норвегия

Получил степень магистра в области электротехники в Норвежском технологическом институте и защитил диссертацию на кафедре прикладной геоматики Университета Калгари (Канада). В настоящее время — менеджер по развитию компании Fugro Seastar.

**Э. Виджен (Erik Vigen)** — Fugro Seastar, Норвегия

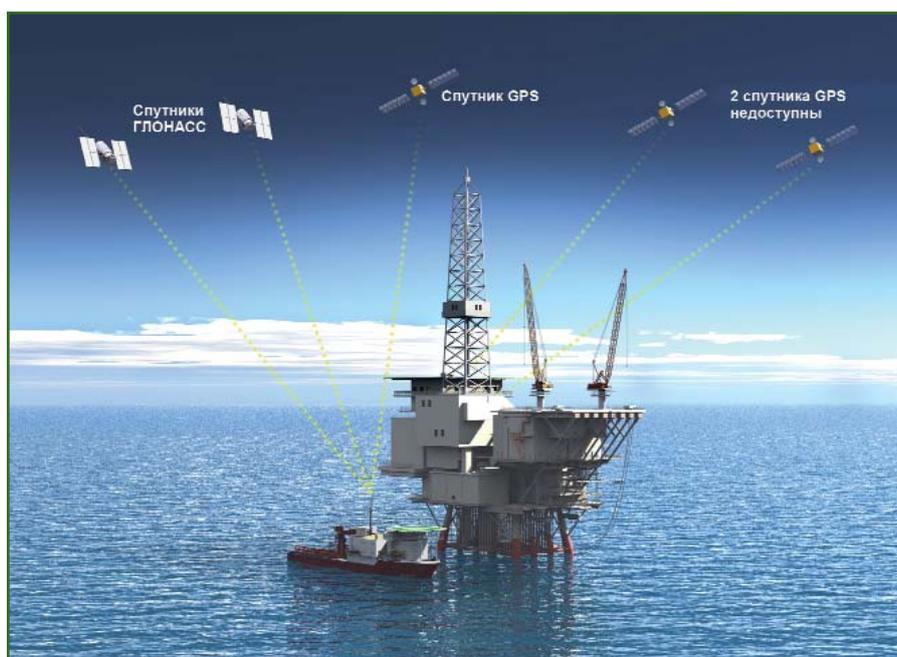
Получил степень магистра в области геодезии в Норвежском технологическом институте. В настоящее время — главный разработчик компании Fugro Seastar.

**О. Орпен (Ole Orpen)** — Fugro Seastar, Норвегия

Получил степень магистра в области электротехники в Норвежском технологическом институте. В настоящее время — старший научный сотрудник компании Fugro Seastar.

**Д. Хельга Улштайн (Jon Helge Ulstein)** — Bourbon Offshore Norway AS, Норвегия

В настоящее время — инспектор по информационным технологиям компании Bourbon Offshore Norway AS, которая является дочерним предприятием компании Bourbon Group (Франция).



**Рис. 1**

*Возможности услуги многосистемного высокоточного позиционирования в режиме реального времени*

Глобальные навигационные спутниковые системы (ГНСС) GPS и ГЛОНАСС в настоящее время составляют группировку из 50 действующих спутников. Это дает существенное повышение доступности и целостности системы, достоверности измерений при одновременном уменьшении времени сходимости, благодаря услуге многосистемного высокоточного позиционирования в режиме реального времени (Precise Point Positioning — PPP). Результаты проведенных полевых испытаний позволяют сделать вывод о том, что теперь нет необходимости дожидаться оптимального расположения созвездия навигационных спутников — наилучшие сочетания доступны в любой момент времени с помощью этого сервиса (рис. 1).

\* Перевод статьи «Pulling in All Signals. PPP with GPS and GLONASS: The New G2», опубликованной в журнале GPS World № 3 (март 2010), выполнен сотрудниками ООО «Сварог».

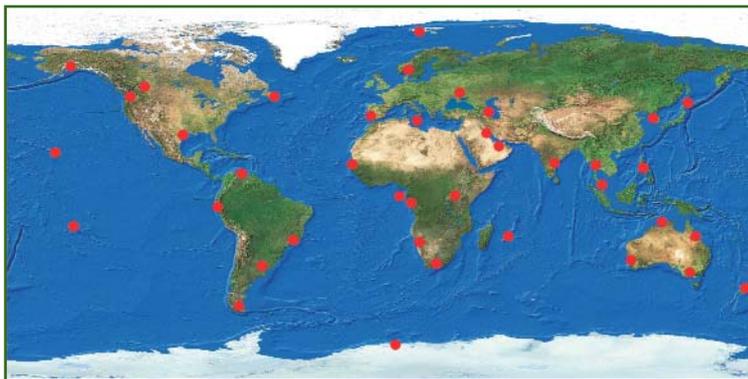


Рис. 2

Сеть опорных станций услуги высокоточного позиционирования в режиме реального времени G2

Сервис PPP является оптимальным методом, обеспечивающим глобальное улучшение пользовательских характеристик как существующих, так и развертываемых систем ГНСС. Для его функционирования требуется меньшее количество опорных станций, чем при использовании классического дифференциального метода. Один и тот же набор данных, содержащий информацию о параметрах орбит (эфемерид) и уходе часов (сдвиге шкал времени), действителен для всех потребителей в любом месте, причем в подавляющем большинстве случаев на навигационное решение не влияют отказы или сбои в работе отдельных опорных станций. Поскольку точные параметры орбит на конкретный момент времени вычисляются на основе обработки данных от всех станций мировой сети, всегда найдется необходимое количество станций, наблюдающих одни и те же спутники. Как результат, сервис PPP обладает большой избыточностью и устойчив к ошибкам (см. Геопрофи. — 2010. — № 2. — С. 27–30. — Прим. ред.).

Результаты испытаний, представленные в данной статье, показывают, что использование системы ГЛОНАСС существенно улучшает доступность и надежность навигационных решений. Это, в свою очередь, представляется значительным шагом в развитии

сервиса PPP. Плановая точность определения местоположения с использованием сервиса G2 (GPS + ГЛОНАСС) оценивается дециметрами, что является результатом увеличения общего числа спутников навигационной группировки на 60%, примерно с 30 до 50 спутников. В действительности, сервис G2 как услуга PPP, основанная на комбинации спутниковых измерений GPS и ГЛОНАСС, принимает вид глобальной дифференциальной подсистемы ГНСС нового поколения. Учитывая тот факт, что в навигационных спутниках нового поколения ГЛОНАСС-М существенно повысилась надежность и продолжительность жизненного цикла по сравнению с их предыдущими модификациями, результаты будут иметь тенденцию к улучшению и впредь, так как существующая группировка ГЛОНАСС постоянно пополняется.

Успешное развертывание сервиса G2 стало возможным благодаря тесному сотрудничеству между компанией Fugro и Европейским центром управления космическими объектами (European Space Operation Centre — ESOC), основанным Европейским космическим агентством (European Space Agency — ESA). Специалисты ESOC имеют многолетний опыт в области технических разработок по высокоточному определению параметров орбит и ухода часов, в

то время как компания Fugro традиционно сильна в предоставлении навигационных услуг, а также услуг высокоточного позиционирования в режиме реального времени.

В результате совместных усилий компания Fugro впервые предложила новую услугу — высокоточное позиционирование G2 в режиме реального времени, которая базируется на круглосуточном точном определении орбит обеих систем: GPS и ГЛОНАСС. Сервис основан на использовании сети опорных станций компании Fugro для точного определения параметров орбит и ухода часов каждого из 50 спутников. Сеть включает около 40 опорных станций, расположенных по всему миру (рис. 2) и оснащенных двухчастотными спутниковыми приемниками GPS/ГЛОНАСС.

«Сырые» данные от всех навигационных спутников направляются в центры обработки информации, где на их основе вычисляются уточненные параметры орбит и уход часов каждого спутника GPS и ГЛОНАСС. Полученные данные транслируются потребителям через сеть геостационарных спутников связи, имеющую практически глобальное покрытие. Спутниковый приемник конечного пользователя, после фазовой обработки двухчастотного сигнала на основе решения PPP, позволяет в режиме реального времени с дециметровой точностью определить местоположение фазового центра антенны приемника.

Как и любые ГНСС-решения, сервис PPP напрямую зависит от того, какое количество спутников находится в зоне прямой видимости антенны приемного устройства. Даже наиболее точные параметры орбиты и уход часов конкретного спутника будут бесполезны, если пользователь не имеет возможности принимать сигналы самого спутника. В то время как часть навига-

ционных спутников может быть невидима по различным причинам, лучшим решением является комбинированное использование всех доступных спутников группировок GPS и ГЛОНАСС. Это особенно актуально при проведении измерений в зонах плотной городской застройки, в лесу, при нахождении судов во фьордах или вблизи нефтегазодобывающей платформы.

Необходимость увеличения количества спутников ГНСС при определении местоположения не подвергается сомнению. Многочисленные исследования обосновывают будущую выгоду от совместного использования GPS и Galileo. Но в настоящее

время доступна и может быть использована только пока еще не полностью развернутая спутниковая группировка ГЛОНАСС. Правительство Российской Федерации предпринимает меры по модернизации этой системы и доведению действующей группировки спутников ГЛОНАСС до 24 к 2011 г. Это учитывает большинство производителей спутникового навигационного оборудования, которые уже выпускают приемники, работающие с двумя ГНСС — GPS и ГЛОНАСС.

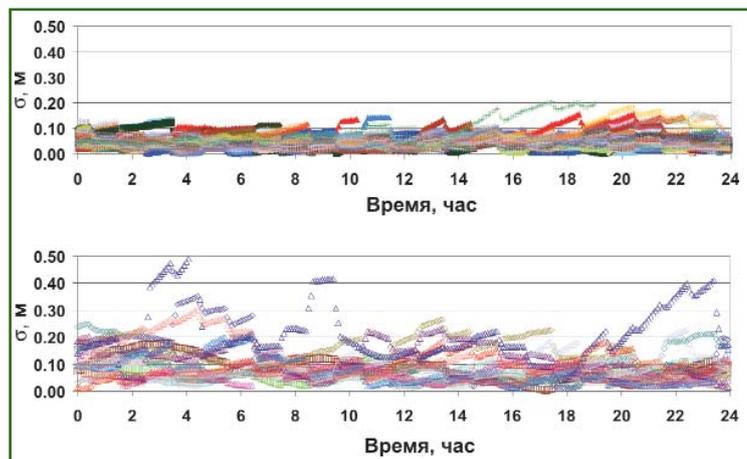
#### ▼ Оценка точности систем GPS и ГЛОНАСС

На рис. 3 представлены графики распределения средних квадратических ошибок опреде-

ления параметров орбит ( $\sigma$ ) GPS и ГЛОНАСС, полученных по результатам измерений, проведенных в режиме реального времени 14 августа 2009 г., относительно данных Международной службы ГНСС (International GNSS service — IGS). Наибольшее влияние на точность определения местоположения оказывает радиальная ошибка орбит, но она не может иметь определяющего значения, поскольку гораздо меньше  $3\sigma$  (диапазон, в который попадает 95% всех вычисленных ошибок). Для системы ГЛОНАСС  $3\sigma$  составляет 22 см, что более чем вдвое превышает аналогичную оценку для GPS ( $3\sigma = 10$  см). Но, несмотря на это, результаты исследований показывают, что такое различие обусловлено низкой точностью только отдельных спутников ГЛОНАСС. В действительности, большинство навигационных спутников ГЛОНАСС обладают точностью параметров орбит, сопоставимой с GPS, что вполне достаточно для реализации сервиса G2.

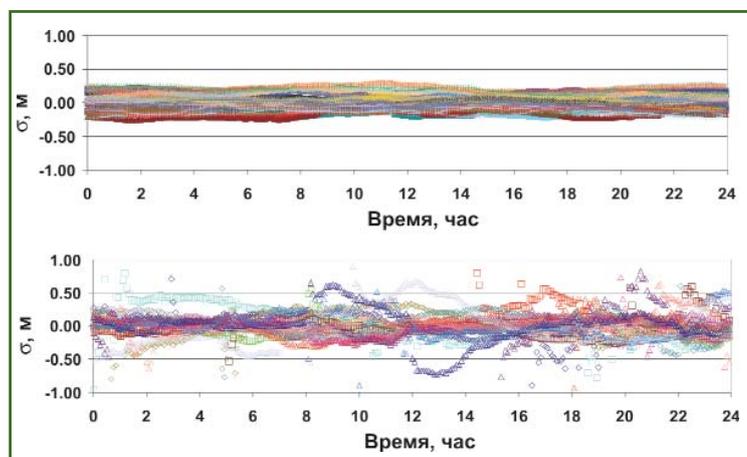
Рис. 4 (вверху) демонстрирует точность часов GPS относительно шкалы времени IGS. Измерения проводились 14 августа 2009 г. Систематические ошибки были исключены с целью совмещения начала отсчета. На рисунке можно различить небольшие индивидуальные погрешности часов спутников GPS, которые ни в коей мере не могут повлиять на точность PPP-решений, в то время как ожидаемая точность позиционирования с помощью сервиса G2 существенно выше той, которую может обеспечить система GPS ( $3\sigma = 21$  см).

На рис. 4 (внизу) приведена оценка точности часов системы ГЛОНАСС ( $3\sigma = 42$  см). В настоящее время у IGS нет решения, сопоставимого по точности с часами системы ГЛОНАСС, поэтому в качестве эталона использовались данные IGS и сети опорных станций Fugro после



**Рис. 3**

Ошибки определения параметров орбит GPS (вверху) и ГЛОНАСС (внизу) относительно параметров орбит IGS



**Рис. 4**

Погрешность часов спутников ГНСС: GPS (вверху); ГЛОНАСС (внизу)

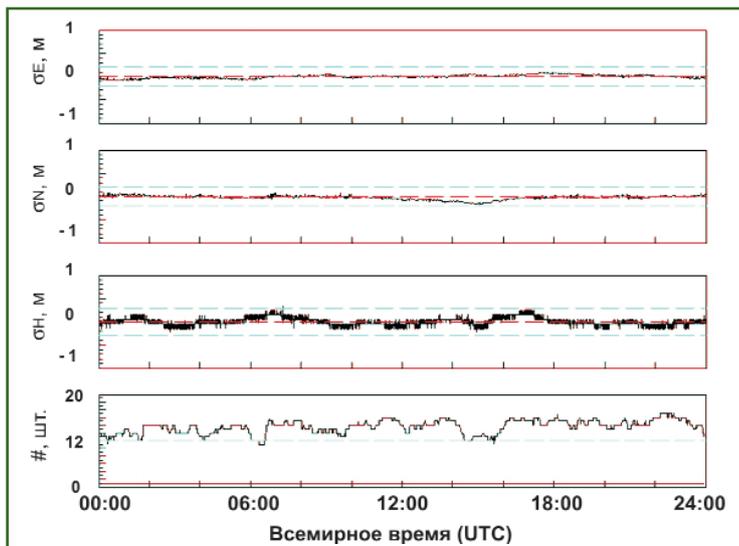
совместной постобработки. Как видно из графика, часы ГЛОНАСС более изменчивы, но достаточно стабильны для обеспечения точной навигации.

**▼ Результаты позиционирования в режиме реального времени**

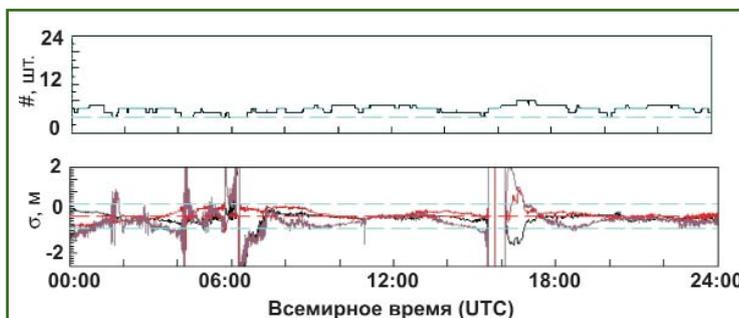
Процесс определения местоположения в режиме реального времени находится под постоянным контролем центра управления и мониторинга в Осло (Норвегия). На рис. 5 представлены типичные результаты позиционирования, полученные при непрерывных измерениях в течение 24 часов в одной точке с помощью сервиса G2.

Линии голубого цвета ограничивают диапазон  $\pm 20$  см для плановых координат и  $\pm 30$  см для высот. Антенна приемника в момент измерений располагалась на открытом месте, обеспечивая беспрепятственный прием сигналов всех спутников созвездия. В качестве истинных значений использовались координаты, определенные независимым методом. При этом для 14 августа 2009 г. средняя квадратическая погрешность измерений составила 3 см в восточном ( $\sigma_E$ ) направлении, 4 см в северном ( $\sigma_N$ ) направлении и 8 см по высоте ( $\sigma_H$ ). Среднее количество наблюдаемых спутников достигало 15.

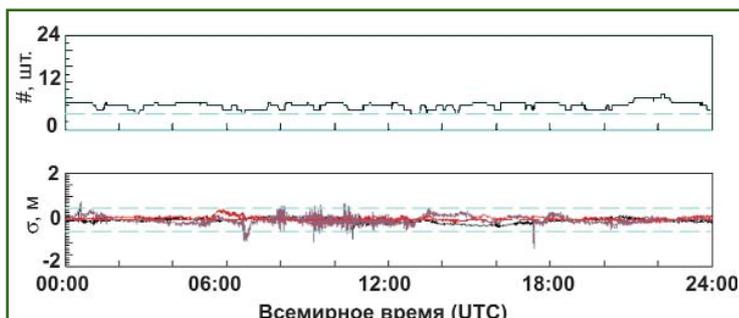
На рис. 6 отражены результаты измерений, выполненных в той же точке и при тех же условиях, что и в случае, приведенном на рис. 5, но с использованием только системы ГЛОНАСС. Линией голубого цвета обозначен диапазон в 50 см. Среднее количество наблюдаемых спутников достигало 5. Следует признать, что для достаточно продолжительного периода времени результаты позиционирования только с помощью ГЛОНАСС выглядят оптимистично. Сбои наблюдались в те моменты, когда антенна принимала сигналы менее чем от четырех



**Рис. 5**  
Результаты непрерывного позиционирования с помощью G2



**Рис. 6**  
Результаты точного позиционирования (сервис PPP) с использованием только системы ГЛОНАСС (14 августа 2009 г.)

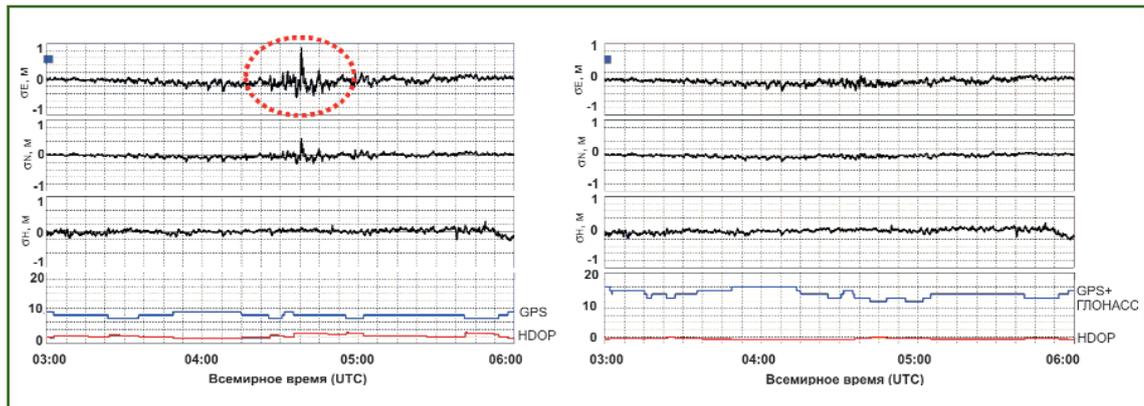


**Рис. 7**  
Результаты точного позиционирования (сервис PPP) с использованием только системы ГЛОНАСС (11 мая 2009 г.)

спутников и во время восстановления созвездия.

Рис. 7 иллюстрирует результаты измерений, проведенных 11 мая 2009 г., когда спутников было несколько больше, что позволило проводить определенные местоположения в течение

24 часов подряд, используя исключительно систему ГЛОНАСС, без явных сбоев. Средние квадратические погрешности составили в плане:  $\sigma_E = 11$  см и  $\sigma_N = 9$  см, а по высоте  $\sigma_H = 16$  см. Учитывая, что среднее количество наблюдаемых спутников в



**Рис. 8**

Результаты измерений, когда сигнал GPS деформирован эффектом многолучевости: с помощью GPS (слева); с помощью GPS и ГЛОНАСС (справа)

этот период было не менее 6, а геометрический фактор снижения точности определения местоположения точки (Dilution of Precision — DOP) временами был довольно высок, результат

можно рассматривать как многообещающий.

Следует отметить, что орбитальная группировка ГЛОНАСС постоянно пополняется новыми спутниками (на 15 октября 2010 г. группировка спутников ГЛОНАСС насчитывала 21 рабочий спутник. — Прим. ред.), и качество функционирования системы неуклонно улучшается. Есть основания надеяться, что до начала 2011 г. ГЛОНАСС сможет стабильно работать в системе высокоточного позиционирования (PPP).

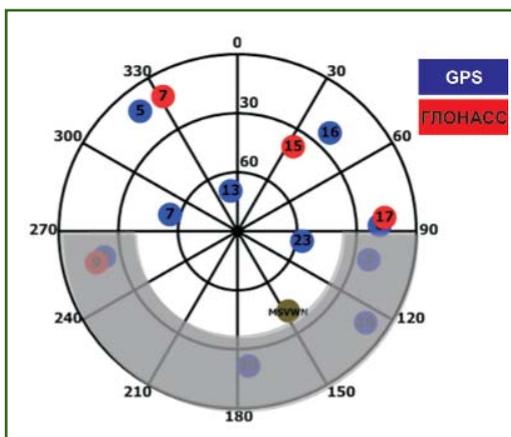
Даже при отсутствии каких-либо препятствий, блокирующих спутники («открытое небо»), использование системы ГЛОНАСС в состоянии улучшить навигационное решение по сравнению с измерениями только по GPS. На рис. 8 (слева) представлен пример такой ситуации, когда сигнал GPS существенно деформирован эффектом многолучевости, особенно в восточном направлении. Рис. 8 (справа) иллюстрирует совместное использование измерений GPS и ГЛОНАСС в тех же условиях. Ошибка позиционирования практически устранена, что говорит о том, что совместное использование GPS и ГЛОНАСС повышает точность и достоверность измерений пространственных координат и при идеальных условиях приема.

Для исследования влияния препятствий, появляющихся

между антенной приемника и частью навигационных спутников и не позволяющих принимать сигналы от этих спутников, была «установлена» модель в виде виртуальной стены, блокирующей получение сигналов антенной от спутников, находящихся в южном полушарии (90–270°) с углом возвышения менее 40° (рис. 9). При такой модели блокировки сигналов от спутников определение координат только с помощью системы GPS становилось невозможным более чем на 20 мин лишь потому, что число доступных спутников составляло менее четырех (рис. 10). За этим провалом следовал период высокого разброса показаний результатов измерений, обусловленный недостаточным количеством спутников и высоким геометрическим фактором DOP.

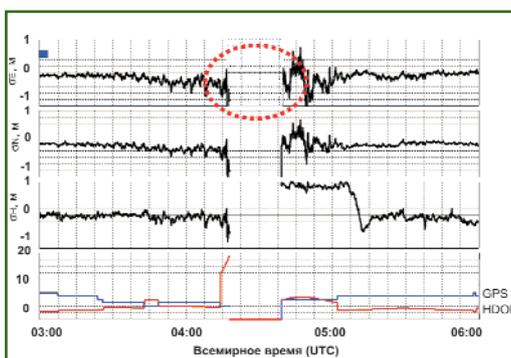
Включение в обработку данных от системы ГЛОНАСС (рис. 11) значительно улучшило общее функционирование системы: количество наблюдаемых спутников было избыточно на протяжении всего эксперимента, что позволило избежать провала, имевшего место в случае использования только GPS (рис. 10).

Нередко возникают случаи, когда в конкретном месте даже при избыточном количестве спутников в группировке GPS (в созвездии более 30 спутников)



**Рис. 9**

Модель блокировки спутников GPS и ГЛОНАСС в южном полушарии

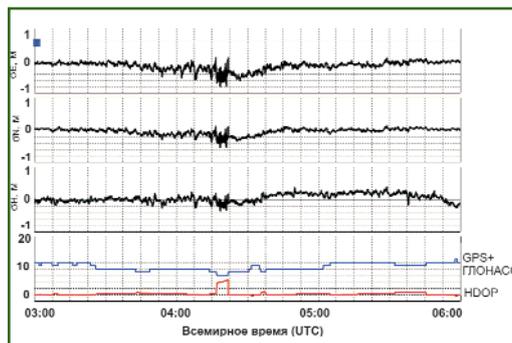


**Рис. 10**

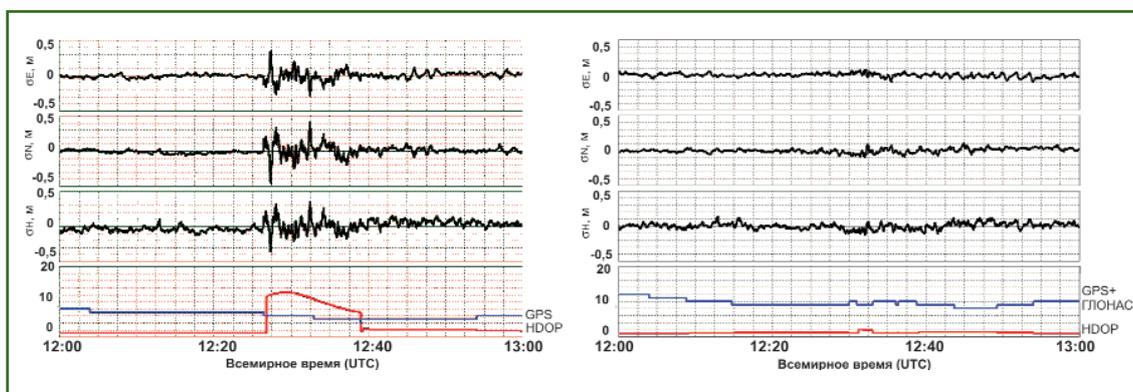
Результаты позиционирования с помощью GPS при блокировке спутников в южном полушарии

невозможно обеспечить приемлемое значение геометрического фактора снижения точности в горизонтальной плоскости (Horizontal Dilution Of Precision — HDOP). Такая ситуация возникла на севере Европы 2 февраля 2009 г., когда один из спутников GPS (PRN17) стал недоступен в связи с проведением профилактических работ, а оставшиеся 6 спутников в силу неблагоприятного геометрического расположения не смогли обеспечить приемлемые значе-

верность измерений, но и, как будет показано ниже, значительно уменьшает время сходимости. Точное позиционирование в режиме реального времени (PPP) не может обойтись без фазовой обработки сигналов, которая, в свою очередь, невозможна без разрешения неоднозначности фазы несущей частоты. Этот процесс требует определенного периода времени, зависящего от геометрического расположения спутников в наблюдаемом созвездии, и называ-



**Рис. 11**  
Результаты позиционирования с помощью GPS и ГЛОНАСС при блокировке спутников в южном полушарии



**Рис. 12**  
Изменения значения HDOP: измерения только с помощью GPS (слева); измерения с помощью сервиса G2 (справа)

ния HDOP, которые в течение 12 мин находились в диапазоне 7–11, как показано на рис. 12 (слева). Такие высокие значения HDOP, как правило, рассматриваются в качестве недопустимых, в связи с чем компания Figro получила ряд извещений от клиентов о неудовлетворительной работе сервиса PPP в море. В это же время пользователи сервиса G2 не зарегистрировали никаких сбоев в работе, спровоцированных резким увеличением значения HDOP созвездия GPS, так как значения геометрического фактора HDOP общего созвездия GPS + ГЛОНАСС поддерживались на уровне не выше 2 (рис. 12, справа).

▼ **Анализ времени сходимости**

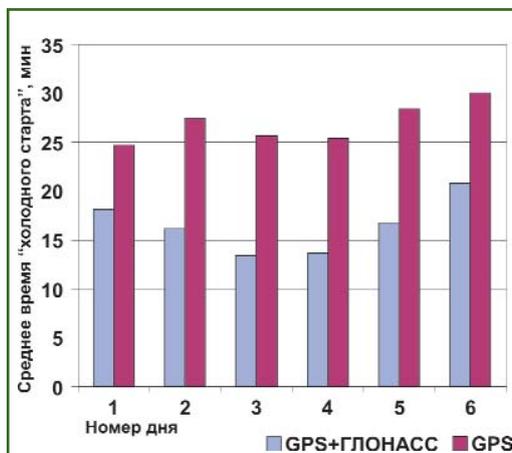
Использование дополнительно системы ГЛОНАСС не только повышает доступность и досто-

еется временем «холодного старта» или конвергенции.

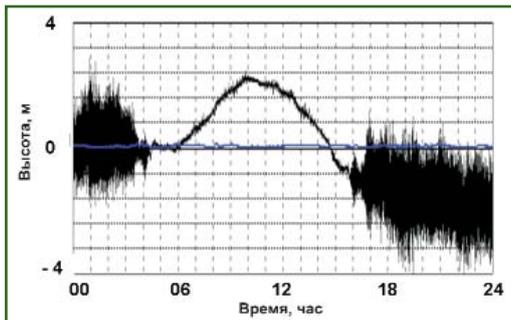
Теоретические исследования ожидаемого времени сходимости GPS по сравнению с GPS + ГЛОНАСС показали, что оно изменяется в течение дня, с максимальным временем «холодного старта» в 75 мин. Комбинированное решение GPS + ГЛОНАСС демонстрирует более гладкую последовательность значений с ожидаемым в среднем улучшением на 50–60% по сравнению с GPS.

Для подтверждения теоретических исследований были выполнены измерения с использованием сервиса G2, результаты которых представлены на рис. 13. «Холодный старт» проводился каждые 5 мин в течение каждого дня на протяжении 6 дней. Всего было произведе-

но 1728 запусков. Критерием сходимости является время, в течение которого  $3\sigma$  не превышает 40 см и остается в этом интервале не менее 10 мин. В среднем время сходимости GPS составило 27 мин, GPS + ГЛО-



**Рис. 13**  
Результаты исследования сходимости — времени «холодного старта»



**Рис. 14**  
Изменения высотного положения судна  
*Bourbon Toraz*

шающем челночные рейды в Северное море и обратно, в один из портов Норвегии. На борту судна тщательно измерялись пространственные координаты как с помощью одной системы GPS, так и с помощью сервиса G2. На рис. 14 приведена картина изменения высотного положения судна, полученная по результатам измерений с помощью сервиса G2. В начале измерений, когда судно находилось в открытом море, ясно ви-

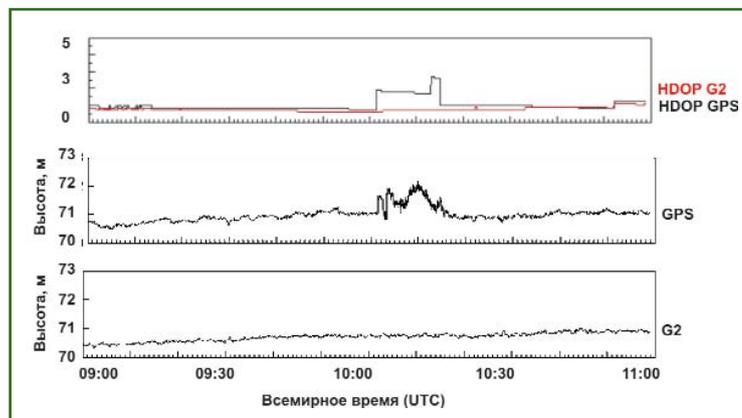
G2, резкое изменение значения HDOP GPS практически не появляло.

Результаты испытаний первого высокоточного навигационного сервиса G2, подтверждают дециметровый уровень точности позиционирования в режиме реального времени. Приведенные в статье примеры показывают, как G2 улучшает характеристики доступности, целостности и времени сходимости по сравнению с GPS.

#### ▼ Аппаратура пользователей

Высокоточный навигационный сервис G2 и другие виды сервисов компании Fugro доступны для большого количества спутникового оборудования, производимого как Fugro, так и другими компаниями. В большинстве случаев приемники включают программное обеспечение Fugro и соответствующий вычислительный модуль для приема и обработки сигналов геостационарных спутников, которые объединены с приемником ГНСС в одном корпусе. Сигналы ГНСС и геостационарного спутника также принимаются одной антенной.

Наряду с собственными моделями спутниковых приемников, таких как SeaSTAR (9200-G2), OmniSTAR-HP (8305HP) и StarPack, компания Fugro предоставляет многим производителям оборудования ГНСС (NovAtel, Trimble, Topcon, Sokkia, Hemisphere GPS, Raven) демодуляторы PPP для их интеграции с выпускаемыми двухчастотными приемниками GPS/ГЛОНАСС.



**Рис. 15**  
Результаты определения высотного положения судна  
*Bourbon Toraz*, находившегося в порту

НАСС — 16,5 мин. Средний уровень достигнутого улучшения времени сходимости достиг 39% с небольшими колебаниями. В наиболее благоприятные дни этот показатель доходил до 50% и был близок к теоретическому значению. Результаты остальных дней дают повод для дальнейшего совершенствования ГНСС. В основном оно может быть достигнуто за счет обновления группировки ГЛОНАСС навигационными спутниками нового поколения и дальнейшего повышения точности определения параметров орбит и ухода часов спутников GPS и ГЛОНАСС через сервис G2.

#### ▼ Результаты испытаний на подвижном объекте

В конце 2008 г. приемное оборудование сервиса G2 было установлено на исследовательском судне Bourbon Toraz, совер-

ден шумоподобный сигнал, обусловленный реальными перемещениями судна по высоте под действием волн. В дальнейшем, во время нахождения судна в порту в течение 12 часов (с 4.00 до 16.00), отчетливо видны плавные изменения высоты, вызванные приливно-отливной активностью, прекратившиеся, как только судно вышло в море.

Еще одно доказательство эффективной работы сервиса G2 было получено 22 июня 2009 г., когда система GPS не смогла обеспечить приемлемые значения HDOP (рис. 15). Результаты определения на борту судна Bourbon Toraz высотного положения показывают, как значения высоты, измеренные с помощью только приемника GPS, «скакнули» практически на 1 м, в то время как на результаты, полученные с помощью сервиса

#### RESUME

Many examples are given in the article to show how the precise navigation service G2 improves the performance in availability, continuity and convergence time as compared to the GPS service. It is marked that the G2 service using the GPS and GLONASS satellite signals provides for the point real time positioning with the decimetric accuracy.