

«Технология обработки сверхдлинных GNSS векторов»

Главный инженер
Кусайко Андрей Сергеевич



Необходимость обработки сверхдлинных GNSS векторов:

- Наличие в интернете измерений на постоянно действующих станциях и их координат;
- Растущее число постоянно действующих референчных станций;
- Коммуникационные технологии, позволяющие обмениваться данными между полем и офисом в режиме реального времени;
- Создание региональных постоянно действующих референчных станций, в том числе для крупных недропользователей, в рамках которых необходимо:
 - корректное определение координат пунктов референчных станций в системах координат WGS84 или ITRF (обработка сверх длинных векторов от пунктов IGS)
 - определение уточненных параметров перехода от WGS84 к требуемой системе координат;
- Мониторинг оседаний и деформаций объектов, недоступных для традиционных измерений, таких как, морские нефтегазодобывающие платформы.



Сложности при обработке сверхдлинных векторов:

- Программное обеспечение поставляемое производителями геодезического оборудования ограничено обработкой базовых линий до 500 км;
- Расстояние между пунктами IGS (International GNSS Service) несущими корректные координаты в Международной земной системе отсчета ITRS (International Terrestrial Reference System) на территории России составляет в среднем 2000 км;
- Обработка сверхдлинных векторов по принятым в коммерческих программах алгоритмам ведет к большим погрешностям, и не позволяет решить неоднозначность.
- Необходимо использовать данные с международных центров обработки GNSS измерений;
- Дороговизна, сложный интерфейс, большое количество факторов и алгоритмов обработки в научных пакетах обработки; (следовательно очень высокий уровень специалистов по обработке этих измерений).

Глобальные проблемы при высокоточной обработке GNSS измерений:

- 1) сильное переменное влияние водяных паров на задержку распространения сигнала, что приводит к необходимости оценивать атмосферную задержку в дополнение к геодезическим параметрам;
- 2) коммерческое производство приемников, содержащих лицензионную информацию, приводит к тому, что детали процедур, используемых в приемниках, не всегда известны;
- 3) отсутствие строгой направленности в антеннах приводит к приему многократно отраженного сигнала и к снижению чувствительности при малых углах возвышения спутников над горизонтом, что ограничивает минимальные углы возвышения, при которых возможны наблюдения;
- 4) спутники имеют как автономную, так и управляемую с Земли систему ориентации и коррекции орбит, осуществляют активные движения с большими панелями солнечных батарей, так что требуется корректирующий контроль для поддержания направления передающих антенн на Землю; все указанные свойства ограничивают длительность точного прогнозирования орбит;
- 5) высокая стоимость функционирования, обслуживания и замены спутникового сегмента, в дополнение к стоимости запусков и наземной подготовки бортовой аппаратуры.

Теоретические основы обработки GNSS измерений

$$P_i^k = \left| \overrightarrow{x^k} - \overrightarrow{x_i} \right| + \Delta trop_i^k + \Delta ion_i^k + c\delta_i - c\delta^k$$

$$L_i^k = \left| \overrightarrow{x^k} - \overrightarrow{x_i} \right| + \Delta trop_i^k - \Delta ion_i^k + c\delta_i - c\delta^k + \lambda N_i^k$$

где

P_i^k - кодовые измерения от станции i до спутника k

L_i^k - фазовые измерения от станции i до спутника k

$\Delta trop_i^k$ - тропосферная задержка

Δion_i^k - ионосферная задержка

$\delta^k \delta_i$ - коррекция часов

λN_i^k - фазовая неоднозначность

Устранение погрешности нестабильности часов

Основным источником погрешности для каждого фазового измерения в отдельности служит нестабильность стандартов частоты как спутника, так и приемника, что приводит к непредсказуемому «уходу» их часов.

$$\begin{aligned} L_{ij}^{kl} = & \left| \vec{x}^k - \vec{x}_i \right| - \left| \vec{x}^k - \vec{x}_j \right| - \left| \vec{x}^l - \vec{x}_i \right| \\ & + \left| \vec{x}^l - \vec{x}_j \right| + \Delta trop_{ij}^{kl} - \Delta ion_{ij}^{kl} \\ & + \lambda N_{ij}^{kl} \end{aligned}$$

В случае достаточно близкого расположения станций описанное первичное дифференцирование устраняет также и эффекты рефракции в тропосфере и ионосфере на пути распространения радиосигнала.

Однако при большом расстоянии между станциями, когда пути распространения сигналов от одного и того же спутника существенно отличаются, применяется второе дифференцирование первичных разностей, на этот раз между спутниками. После такой операции удастся полностью подавить влияние нестабильности часов на станциях.



Устранение погрешности влияния тропосферы

Другим существенным источником ошибок фазовых измерений является задержка, возникающая под влиянием ионосферы, которая проявляет заметную изменчивость как во времени, так и в пространстве. Устранить влияние ионосферы удастся благодаря дисперсионным свойствам данного вида задержки, т.е. ее различной величины на двух разных частотах $L1$ и $L2$

Линейная комбинация

$$\varphi_{LC} = 2.546\varphi_{L1} - 1,984\varphi_{L2}$$

практически полностью свободна от ионосферной задержки (не более милли-метра при оценке расстояния до спутника).

Если станции наблюдения разнесены на достаточно большое расстояние, то точность результатов существенно зависит от погрешностей в оценках координат и скоростей спутников, т.е. от погрешности моделирования их орбит.

Влияние точности определения орбит на вектора различных длин

Ошибка определения орбит	Длина вектора (базовой линии)	Относительная ошибка определения	Ошибка определения длины вектора
25м	1 км	1мм/1км	1 мм
25м	10км	1мм/1км	10 мм
25м	100 км	1мм/1км	100 мм
25м	1000 км	1мм/1км	1000мм

Эволюция точности определения орбит

Ошибка определения орбит	Длина вектора (базовой линии)	Относительная ошибка определения	Ошибка определения длины вектора
25м	1000 км	1мм/1км	1000 мм
2,5м	1000 км	0,1 мм/1км	100 мм
0,25м	1000 км	0,01 мм/1км	10 мм
0,05м	100 км	0,002 мм/1км	0,2 мм
0,05м	1000 км	0,002 мм/1км	2 мм

Характеристики доступных орбит

Тип орбит (эфемерид)	Точность	Доступность получения
Передаваемые со спутника	2 м	В реальном времени
IGS Ультрабыстрые:	10км	
(априорные)	10 см	В реальном времени
предварительные	5см	3 часа
IGS Быстрые	< 5см	17 часов
IGS Окончательные	< 5см	5-11 дней

В 2011 году точность орбит достигла 2 см, как GPS, так и ГЛОНАСС орбит

Дополнительные данные для обработки сверхдлинных векторов GNSS:

- Уточненные орбиты (Эфемериды)
- Ультрабыстрые априорные орбиты
- Параметры ориентации Земли
- Модель изменения полюсов и вращения Земли
- Коррекция часов спутников и приемников
- Ионосферная модель
- Тропосферная модель (Vienna Mapping Functions)
- Модель движения тектонических плит
- Эксцентриситет фазового центра антенны
- Координаты и скорости пунктов IGS
- Данные сбоя и неполадок спутников
- Модель приливов и отливов
- Модель Геоида



ГеоПрофи

Импортозамещение европейских сервисов по спутниковому мониторингу смещений и осадок на длинных расстояниях



ГеоПрофи

Спутниковый мониторинг на основе GNSS сети Neda (Российский сегмент сети IGS)

- **Цель работы:** Создание российского аналога европейского сервиса для спутникового мониторинга смещений и осадок GPS/Glonass антенн при мониторинге нефтегазодобывающих морских платформ
- **Необходимость использования:**
 - Ввиду отсутствия опоры, для выполнения наблюдений за деформациями и оседаниями на морских нефтяных платформах, наилучшим методом наблюдений за оседаниями является спутниковый мониторинг;
 - Расстояния до платформ от исходных пунктов составляет от сотен до тысяч километров, при таких расстояниях использование программного обеспечения, поставляемого изготовителями приемников, сталкивается с ограничениями при расчете векторов, с проблемами разрешения неоднозначности и не достигает требуемой точности на субсантиметровом уровне
 - При обработке сверхдлинных базовых линий необходим учет множество факторов снижающих точность измерений, такие алгоритмы обработки реализуются в исследовательских программных пакетах обработки GNSS измерений, такие как Bernese, Gammit;
 - Для спутникового мониторинга необходима, потоковая, приближенная к онлайн, обработка базовых линий и выдача отклонений координат центров антенн, это невозможно сделать без автоматической обработки информации из центров обработки сети IGS (такие как CODE и т.п.).



Примеры выявленных оседаний и деформаций при разработке шельфовых месторождений , результаты моделирования ШГКМ

На нефтяных промыслах Северного моря , разрабатываемых с 1969-75 гг ., по замерам ,начатым с 1984 года , скорость оседания морского дна (погружения платформ) составляла в среднем 0,4 м / год , снизившись в 1988-89 гг . до 0,3 м / год . При этом в бортах мульды оседания погружение платформ , происходившее с небольшим запрокидыванием ,оказалось примерно вдвое меньше , чем в её центральной части .

По предварительным оценкам , прогибание донной поверхности при эксплуатации Штокмановского ГКМ приведёт через 15-25 лет эксплуатации (в зависимости от объёма извлечённых флюидов) к формированию мульды оседания глубиной в центральной части порядка 10 м [*]. Деформации донной поверхности вызовут опускание платформ с уменьшением высоты пролётного строения платформ над уровнем моря , а в краевых частях мульды возможен наряду с опусканием наклон платформ и другие их деформации.

•Оценка устойчивости геологической среды на морских месторождениях углеводородов в Арктике
С.А. Козлов, ВНИИОкеангеология МПР РФ, Санкт-Петербург



Сравнительная оценка морских месторождений углеводородов Западноарктического шельфа России и Северного моря

Типы месторождений	Месторождения	Тип флюида	Возраст продуктивных толщ	Интервал нефтегазонасыщенности, м	Тип и пористость коллектора	Ожидаемые природно-техногенные процессы
А ₁ : Месторождения асейсмичных областей в мезозойских относительно слабоуплотнённых отложениях со средней сжимаемостью, разбитых редкой сетью разрывных нарушений, в областях интенсивного проявления криогенеза и воздействия плавучих припайных льдов на сооружения	Штокмановское	Газо-конденсат	J ₁₋₂	1813-2479	Слабосцементированные песчаники (15-27%)	Вызванные землетрясения, оседание донной поверхности при эксплуатации месторождений углеводородов, активизация криогенеза, оползней и сплывов
	Лудловское	Газ	J ₃	1321-2388	Слабосцементированные песчаники и алевролиты (14-27%)	
	Ленинградское и Русановское	Газ	K	1150-2550	Слабосцементированные алевролиты и песчаники (14-35%)	
А ₂ : То же в областях отсутствия криолитозоны и слабого воздействия плавучих льдов	Мурманское	Газ	T ₁₋₂	2450-3150	Пески, слабосцементированные песчаники	То же без активизации криогенеза
	Экофиск	Нефть	K ₂	3100-3322	Рыхлые известняки (25-35%)	
	Берген	Газ	K ₂	1698-2521	Слабосцементированные песчаники (15-20%)	
	Эндфиск	Нефть	K ₂	2789-2905	Рыхлые известняки (25-30%)	
Б: Месторождения асейсмичных областей в литифицированных палеозойских отложениях средней и высокой уплотнённости, с редкой сетью разрывных нарушений, в областях проявления криогенеза, воздействия плавучих льдов на сооружения, повышенной интенсивности перемещения наносов	Поморское	Газо-конденсат	P ₁	2595-2660	Известняки (4-15%)	Активизация криогенеза
	Приразломное	Нефть	C ₃ -P ₁	2368-2487	Известняки (4-24%)	
	Варандей-море	Нефть	P ₁	1714-1738	Известняки (11-15%)	
	Медынское-море	Нефть	C ₃ -P ₁	1185-1300	Известняки (11-15%)	

Пример размещения GNSS оборудования на морской платформе



ГеоПрофи

Схема обработки базовых линий от пунктов IGS



ГеоПрофи

Пункт сети Neda в г.Волгоград

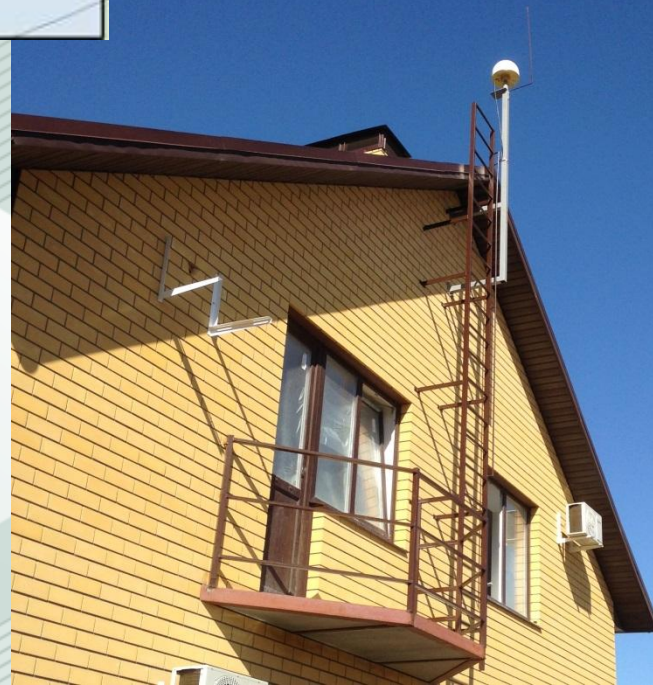


Технические условия монтажных работ по местам крепления антенн:

- при монтаже вертикальная ось кронштейна должна быть выставлена по уровню;
- верхний срез кронштейна должен находиться минимум на 0,5м выше препятствий;

-способ монтажа должен обеспечивать долговременное (более 5 лет) стабильное положение кронштейна;

- исключить наличие потенциальных источников переотражения сигналов или помех.



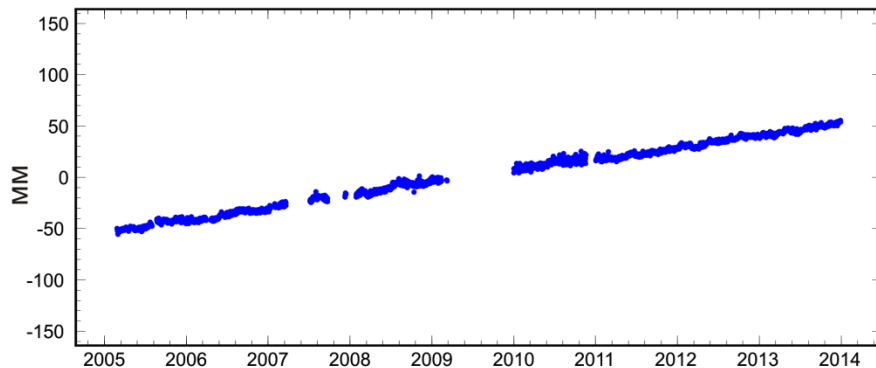
Варианты представления результатов обработки данных ГНСС-наблюдений



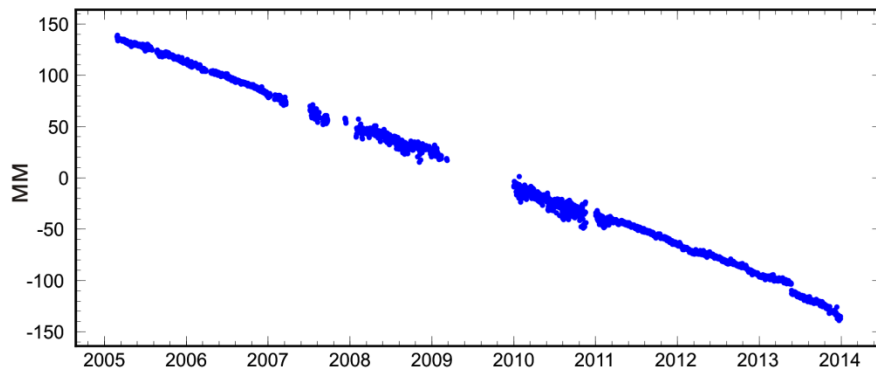
ГеоПрофи

1. Временные ряды наблюдений

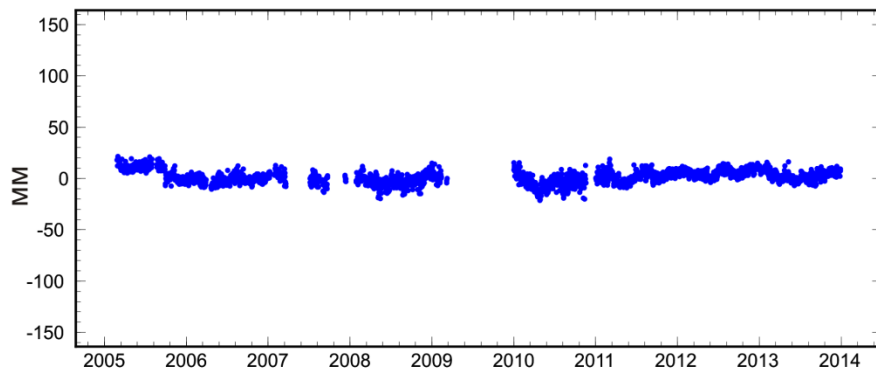
BRNG Северная компонента смещения



BRNG Восточная компонента смещения

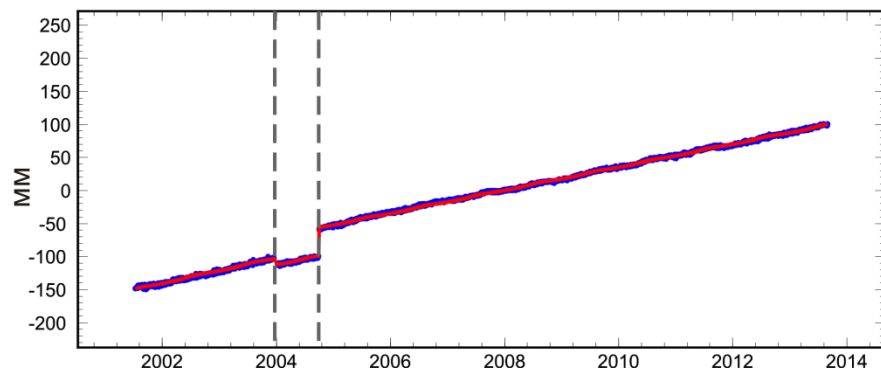


BRNG Вертикальная компонента смещения

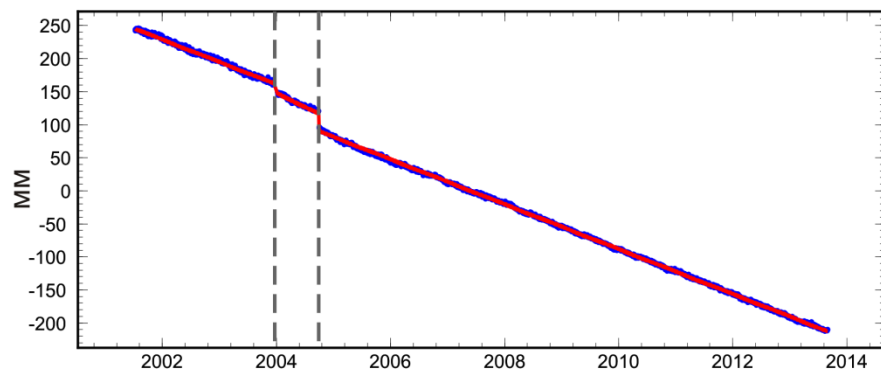


ГеоПрофи

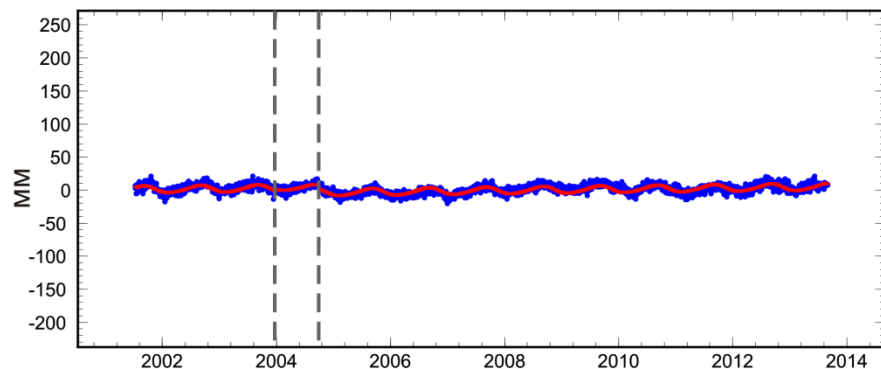
HOGS Северная компонента смещения



HOGS Восточная компонента смещения



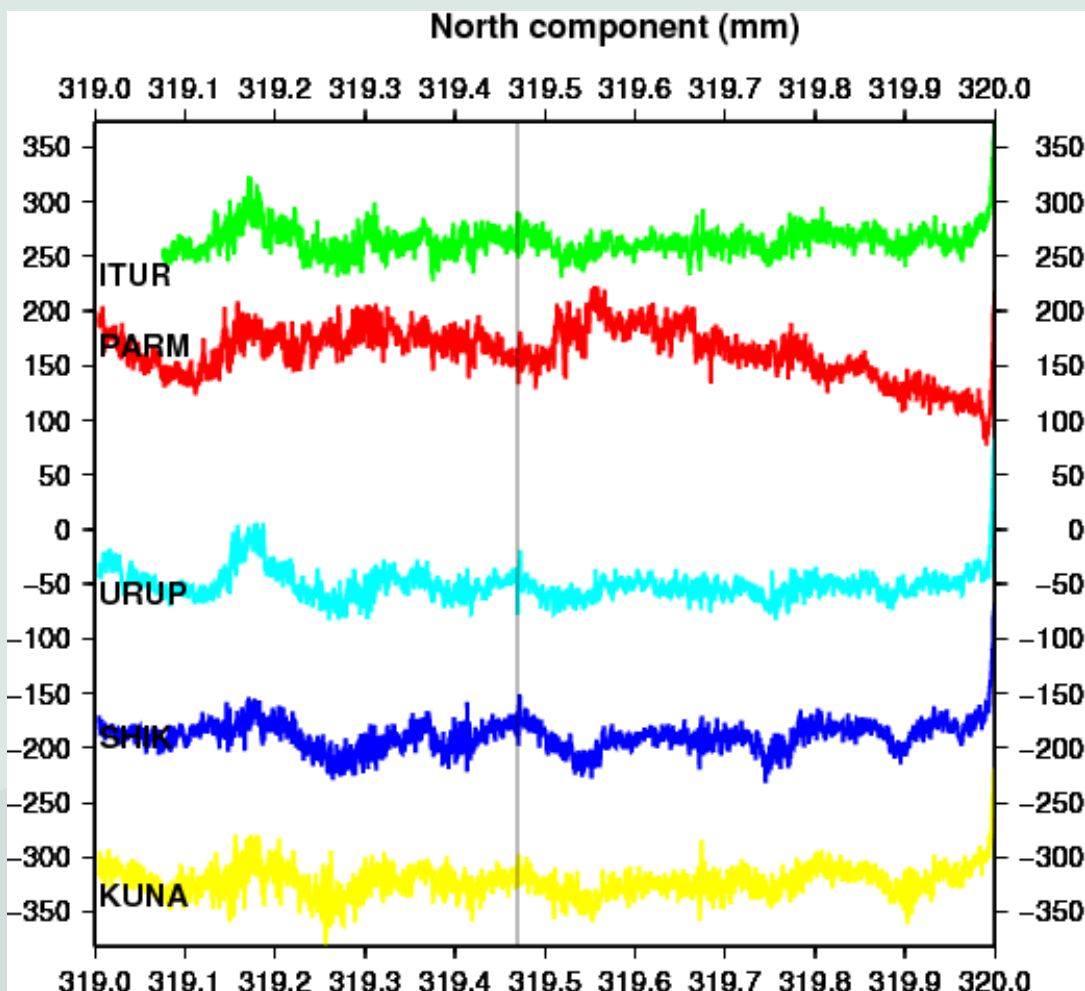
HOGS Вертикальная компонента смещения



2. Временные ряды наблюдений + данные регрессионной модели



ГеоПрофи



4. Изменение базовой
линии от выбранной
опорной станции до
соседних станций в
режиме близком к
реальному времени
(NRTS-режим)



ГеоПрофи

Пример оценки параметров регрессионной модели для станции HOGS

Параметры регрессионной модели	Северная компонента	Восточная компонента	Вертикальная компонента
Начальное смещение ряда (мм)	-149.189 ± 0.547	244.949 ± 0.629	0.636 ± 1.454
Стационарная скорость смещения (мм/год)	19.119 ± 0.479	-33.944 ± 0.551	0.839 ± 1.248
Амплитуда годовой гармоники (мм)	0.873 ± 0.190	0.414 ± 0.224	5.185 ± 0.501
Фаза годовой гармоники (в градусах)	32.1	59.6	45.4
Амплитуда полугодовой гармоники (мм)	0.179 ± 0.134	0.058 ± 0.156	0.764 ± 0.355
Фаза полугодовой гармоники (в градусах)	36.7	24.1	29.7
Амплитуда белого шума (мм)	0.533 ± 0.002	0.560 ± 0.002	6.020 ± 0.117
Амплитуда фликкер-шума (мм)	0.667 ± 0.002	0.897 ± 0.003	4.509 ± 0.118

Заключение о технологии

- Разработанная технология потоковой обработки сверхдлинных GNSS векторов является полным аналогом сервисов предоставляемых европейскими и североамериканскими центрами обработки;
- Сервис защищен информационно, т.е. нет необходимости направлять данные на зарубежные серверы, и информация о возможных деформациях не просочится в зарубежные СМИ и т.д.
- Российский сегмент IGS Сеть Neda позволяет сгустить сеть вокруг участка работ без процедуры регистрации в сеть IGS, без потери точности и долговременных обязательств;
- Стоимость выполнения мониторинга объекта стабильна и не зависит от курса валют;
- Сервис работает в тестовом режиме;
- Для заинтересованных Заказчиков работ может быть предоставлен доступ сроком на 1 месяц на бесплатной основе.



ГеоПрофи

О компании

- Компания основана в 2006 году. «НПП«ГеоПрофи» сегодня — это динамичная команда опытных руководителей, высококвалифицированных и молодых специалистов.
- Компания специализируется на выполнении маркшейдерских, топографо–геодезических, комплексных инженерных изысканиях, гидрографических и землеустроительных работах, обработке данных дистанционного зондирования, лазерном сканировании. Мы занимаем уверенную позицию на рынке инженерных услуг, благодаря использованию инновационных технологий и нестандартных решений.
- На предприятии внедрены и действуют системы управления качеством продукции в рамках государственного стандарта ГОСТ Р ИСО 9001 - 2008 и активного обучения и повышения квалификации персонала.
- Мы смотрим в светлое будущее, которое строим сами!
- Сайт компании www.nppgeoprofi.ru

Спасибо за внимание!