

**ОЦЕНКА ВОЗМОЖНОСТЕЙ СПУТНИКОВЫХ НАВИГАЦИОННЫХ  
ИЗМЕРЕНИЙ ДЛЯ ИЗУЧЕНИЯ КИНЕМАТИКИ И ДИНАМИКИ  
МОРСКОГО ЛЬДА  
(ПО ДАННЫМ РОССИЙСКИХ ДРЕЙФУЮЩИХ СТАНЦИЙ СП-33 И СП-35)**

*И.Б.ШЕЙКИН, В.Н.СМИРНОВ, С.М.КОВАЛЕВ*

*ГНЦ РФ Арктический и антарктический научно-исследовательский институт*

*В предлагаемой работе рассматриваются возможности использования спутниковых навигационных систем для изучения кинематики и динамики морского льда на примере полевых GPS-измерений скорости дрейфа, ускорений и вращения ледяных полей дрейфующих станций СП-33 и СП-35, выполненных с помощью GPS-приемников гражданского назначения. Предлагаются различные методы оценивания точности позиционирования и калибровки полевого измерительного комплекса, разработанные на основе статистического анализа. Показано влияние ошибок округления вычислений на результаты измерений, и рассматриваются пути их уменьшения. Выполнено статистическое моделирование измерений скорости дрейфа и ускорений, и определены границы применимости нормального распределения и Гамма-распределения при интерпретации данных. Установлена зависимость погрешности измерений от интервала усреднения исходных данных, и даются рекомендации для планирования полевых экспериментов. Обсуждаются проблемы интерпретации данных, а также перспективы развития GPS-измерений применительно к геофизике морского льда.*

Методы точного позиционирования с использованием спутниковых навигационных систем находят все большее использование в геофизических [6] и гляциологических исследованиях [9, 10]. Применительно к проблемам геофизики морского льда представляют интерес измерения таких характеристик, как 3D-координаты, скорость дрейфа и вращение ледяных полей [7], а также ускорения и нагрузки, возникающие при их взаимодействии. Некоторые из этих измерений проводились в рамках международной программы арктических буев [11], однако их возможности были ограничены трафиком спутниковых каналов связи и потребляемой энергией. В условиях обитаемой дрейфующей станции эти факторы не критичны, что позволяет детально исследовать потенциальные возможности измерительной системы и работать на пределе ее разрешающей способности. Новые методы измерений с использованием спутниковых навигационных систем являются сегодня перспективным направлением для решения проблем геофизики морского льда, и их разработка и применение могут значительно расширить наши возможности по изучению механики деформирования и разрушения ледяного покрова [5].

Одна из основных проблем GPS-измерений состоит в определении реальной точности позиционирования и выделении полезной информации на фоне естественных и искусственных шумов [1]. Такая калибровка не вызывает затруднений, когда измерительная точка неподвижна [4], однако в условиях дрейфующих льдов Арктического бассейна требуется разработка косвенных методов оценивания. В предлагаемой работе рассматривается, в частности, метод с использованием двух GPS-приемников, установленных на одном ледяном поле. В этом случае реальная дистанция между GPS-антеннами не меняется, а вариации вычисленной

псевдодистанции связаны с ошибками измерений двух GPS-каналов, что позволяет детально исследовать статистические и спектральные характеристики шумов и оптимизировать измерительные каналы. С помощью такого подхода были получены оценки погрешности GPS-измерений дистанции и производных от нее скорости дрейфа и ускорений ледяного поля. Независимые оценки погрешности измерения скорости дрейфа и ускорений были получены также с помощью регрессионного анализа для последовательности данных двух относительно независимых измерительных каналов. Для получения оценки абсолютной погрешности GPS-измерений для каждого из каналов в отдельности рассматривается метод, основанный на определении референц-траектории дрейфа ледяного поля, относительно которой вычисляются погрешности абсолютного позиционирования в полосе частот более 0,25 МГц. Этот метод предлагается использовать для индивидуальной калибровки GPS-приемников на подвижной платформе.

Впервые в практике российских полярных исследований методика двухточечных GPS-измерений с минутным интервалом регистрации данных была использована на ледяном поле дрейфующей станции СП-33, траектория дрейфа которого показана на рис. 1 г. Измерения проводились в период с 28 мая по 18 августа 2005 г. с помощью двух портативных GPS-приемников типа «GARMIN-GPS-12» и «GARMIN-MAP-76», схема расстановки которых показана на рис. 1 а.

Дистанцию между GPS-приемниками можно считать постоянной, поскольку нарушения сплошности ледяного поля в пределах измерительного полигона не наблюдалось, а интенсивность динамических и термических деформаций льда много меньше масштаба и погрешности измерений. Неизменность дистанции подтверждается также данными GPS-измерений, которые показали, что до 12 июля псевдо-

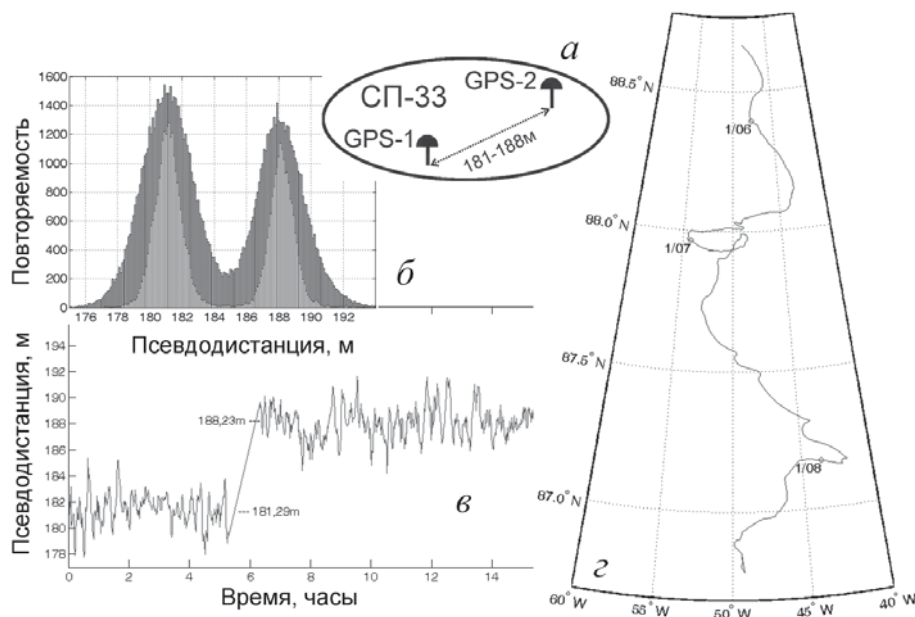


Рис. 1. Участок траектории дрейфа ледяного поля СП-33 (г), схема расположения GPS-приемников на ледяном поле (а), участок записи псевдодистанции со скачком в 6,9 м при изменении позиции одной из антенн (в), гистограммы распределения псевдодистанции до и после фильтрации (б)

дистанция между GPS-антеннами составляла 181,29 м, а после – 188,23 м. 12 июля имело место перемещение на 6,96 м измерительной лаборатории с ледяного пьедестала, образовавшегося в результате поверхностного таяния льда. Это событие нашло отражение в записи псевдодистанции на рис. 1 *в*. Отметим, что оценки средней псевдодистанции, приведенные выше с точностью до второго знака после запятой, являются статистически обоснованными, поскольку 95 % ошибка этих оценок составляет 0,03 м для исходного ряда и 0,015 м после низкочастотной фильтрации. Гистограммы на рис. 1 *б* показывают, что около 75 % дисперсии псевдодистанции сосредоточено в диапазоне частот с периодом менее 1 часа.

Использование гражданских GPS-приемников с относительно большой ошибкой позиционирования является компромиссным решением на начальном этапе исследования как альтернатива профессиональным GPS-приемникам с высоким пространственным разрешением и стоимостью, использование которых предлагается в дальнейшем для обеспечения прецизионных измерений.

Полевой персональный компьютер обеспечивал ежеминутную запись исходных данных, их форматирование и архивирование. Однако фиксация координат двух GPS-приемников осуществлялась в различные моменты времени, в результате чего в относительных измерениях возникала асинхронная ошибка, величина которой в среднем была сравнима с погрешностью измерений. Для устранения асинхронной ошибки исходные данные GPS-измерений были синхронизированы и с помощью стандартных функций линейной интерполяции приведены к целочисленным минутам при точности синхронизации около одной секунды. Сравнение исходной траектории дрейфа ледяного поля и траектории, построенной по синхронизированным данным, показывает удовлетворительное качество работы алгоритма линейной интерполяции, однако побочным эффектом синхронизации данных является некоторое сглаживание траектории дрейфа за счет взвешенного усреднения на интервале между точками измерений.

Еще одна проблема обработки данных состояла в том, что из-за особенностей функционирования аппаратуры в полевых условиях исходная база данных сильно фрагментирована. За весь период наблюдений имеются только несколько фрагментов с продолжительностью непрерывной записи 3–4 дня при средней ее продолжительности около суток. После синхронизации данных двух GPS-приемников их фрагментация значительно возрастает, что создает дополнительные трудности при анализе синхронизированных данных. В связи с чем хотелось бы обратить внимание руководства проекта дрейфующих станций «Северный полюс» на необходимость повышения качества исходной базы данных GPS-измерений за счет повышения надежности аппаратуры, энергообеспечения и методики измерений. Оставляет также желать лучшей стандартизации формата базы исходных данных по разделу координатных измерений, как между различными группами наблюдателей, так и между различными станциями.

На основании синхронизированных данных двух разнесенных GPS-приемников были получены оценки дистанции и азимута отрезка пути между ними. Вычисление производилось по кратчайшему расстоянию между двумя точками по дуге большого круга с использованием стандартных математических функций. Пример вычисленной дистанции, далее называемой псевдодистанцией, показан на рис. 1 *а*. Отметим, что дисперсия этих оценок основана на практически одно-временных измерениях двух GPS-приемников, дистанция между которыми составляет примерно  $10^{-5}$  от длины трассы навигационных радиосигналов, и в силу этого она аккумулирует в основном шумы реверберации сигнала в ближней зоне антенны, кабельные и алгоритмические шумы, так же как и слабо коррелированные шумы на трассе распространения радиоволн. В таких условиях детальный выбор места для антенны и полевая калибровка измерительных каналов являются

необходимым условием для получения качественных экспериментальных данных. К сожалению, проведение калибровочных экспериментов на дрейфующей станции запланировано не было, и поэтому характеристики двух измерительных GPS-каналов имели значимое различие, что нашло отражение в анализе данных и будет показано ниже. Оценки вращения ледяного поля и скорости его вращения являются важным самостоятельным элементом мелкомасштабной динамики морского льда, однако в рамках предлагаемой работы они рассматриваются как один из параметров полевого эксперимента.

Обычно применительно к GPS-системам используют следующие показатели точности измерений [8]: *вероятная круговая погрешность* (Circular Error Probable = CEP), *горизонтальная среднеквадратическая погрешность* (Horizontal Root Mean Square = HRMS) и *удвоенная среднеквадратическая погрешность* (Twice Distance Root Mean Square = 2DRMS). Эти показатели отображают горизонтальное расстояние от истинного местоположения, в пределах которого расположены 50 %, 68 % и 95 % измеренных точек соответственно. При этом предполагается пространственная анизотропия ошибок измерений и симметричная форма облака рассеяния. Из-за особенностей GPS-измерений на дрейфующем льду в высоких широтах последнее предположение не всегда выполнялось, и вследствие этого для анализа пространственного рассеяния точек измерений было использовано эллиптическое приближение.

На рис. 2 а можно видеть облако рассеяния и эллипсы концентрации 95 % обеспеченности (2DRMS) точек позиции дополнительного GPS-приемника в прямоугольной системе координат, центр которой совпадает с позицией основного GPS-приемника, а вертикальная ось ориентирована по локальному меридиану.

Серый эллипс построен на основе совместной двумерной функции распределения вероятности с учетом корреляции измерений по ортогональным координатам. Он имеет две основные полуоси, с размером 6,2 м и 4,0 м соответственно, которые характеризуют *удвоенную среднеквадратическую погрешность* по основным направлениям. Белый эллипс построен на основе двух частных функций распределения вероятности по ортогональным координатам. Он имеет две оси с размером 5,0 м и 3,6 м, которые характеризуют *удвоенную среднеквадратическую погрешность* для каждого из частных распределений, показанных на рис. 2 б, в. Текстовая информация на рисунке отражает стандартное отклонение по основным направлениям совместного и частного эллипсов концентрации. Как видно из рисунка, основанные на совместном законе распределения оценки в среднем на 10–20 % больше оценок, основанных на частных распределениях, что отражает известный в статистике эффект суммирования дисперсии независимых случайных процессов [2]. Вследствие этого для более точного количественного оценивания статистик необходимо использовать параметры совместного распределения, а параметры частных распределений дают систематически заниженные оценки и могут быть использованы только для приблизительных расчетов.

На рис. 2 а и 2 б можно видеть эффект периодического группирования точек облака рассеяния по широте, так же как и отсутствие такого эффекта по долготе. При этом обычно наблюдаются две системы групп, пространственный период которых составляет около 1,9 м, что близко к ошибке округления географических координат, которая для GPS-приемников второго поколения составляет тысячную долю минуты или 1,852 м по широте. Длина минуты долготы в районе дрейфа станции менялась от 49 м на широте 88,5° до 113 м на широте 86,5° (рис. 1 б), а соответствующая ошибка округления по долготе изменялась от 5 до 11 см, что значительно меньше ошибок измерения. Вследствие этого ошибки округления находят отражение только при вычислении широты, и это является существенным недостатком GPS-приемников второго поколения. Для GPS-приемников третьего поколения точность округления улучшена на порядок, что автоматически снимает

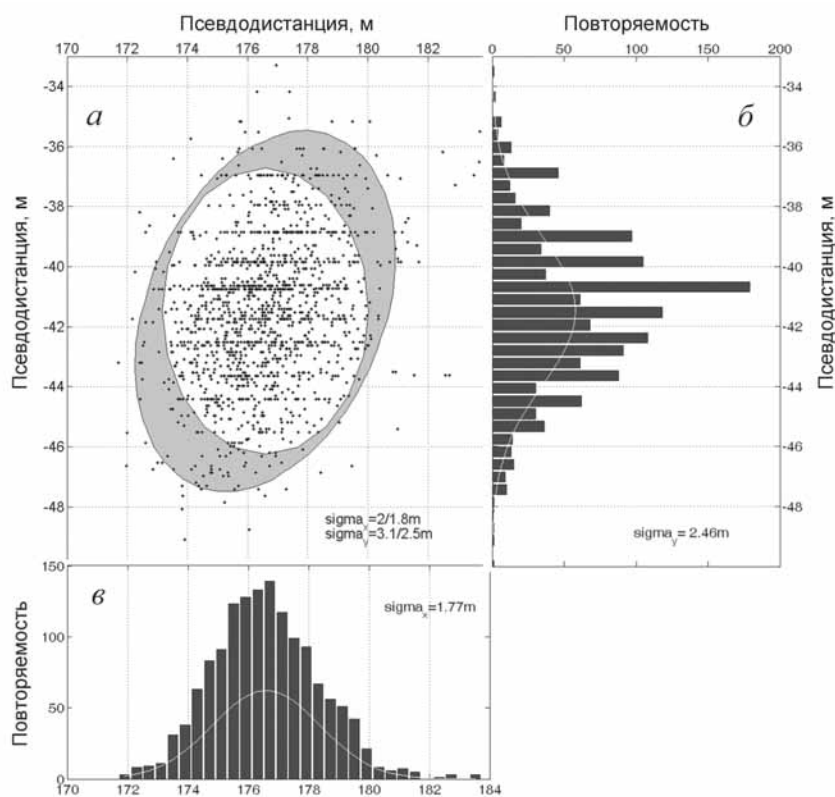


Рис. 2. Выборочные диаграммы рассеяния:

*a* – суточное рассеяние позиции дополнительного GPS-приемника относительно основного GPS-приемника, расположенного в центре прямоугольной системы координат. Эллипсы концентрации 95 % обеспеченности для совместной и двух частных функций распределения – серый и белый соответственно,  $\sigma_x$  и  $\sigma_y$  – соответствующие стандартные отклонения по основным осям; *б*, *в* – частные гистограммы распределения по широте и долготе соответственно совместно с функциями плотности вероятности в нормальном приближении

проблему группирования точек рассеяния и соответствующие дочерние проблемы, которые возникают при вычислениях значений скорости и ускорения.

Форма облака рассеяния отражает нестационарность выборочного распределения на интервале анализа, вероятная причина которой состоит в том, что в течение суток наблюдался медленный поворот измеряемого ледяного поля примерно на  $2,5^\circ$  против часовой стрелки. В результате этого средняя позиция дополнительного GPS-приемника в относительных прямоугольных координатах имела постоянное смещение, а суммарное облако рассеяния было растянуто по касательной к радиусу вращения. В таких условиях репрезентативной 2DRMS-оценкой точности относительного позиционирования можно считать малую полуось совместного эллипса концентрации, размер которой для исходной суточной выборки составляет около 4 м.

С целью исследования дисперсии ошибок был выполнен спектральный анализ флуктуаций псевдодистанции и установлено, что основная часть дисперсии сигнала погрешности измерений локализована в области частот от 0,5 до 2 МГц, что можно видеть на рис. 3 *a*, *г*.

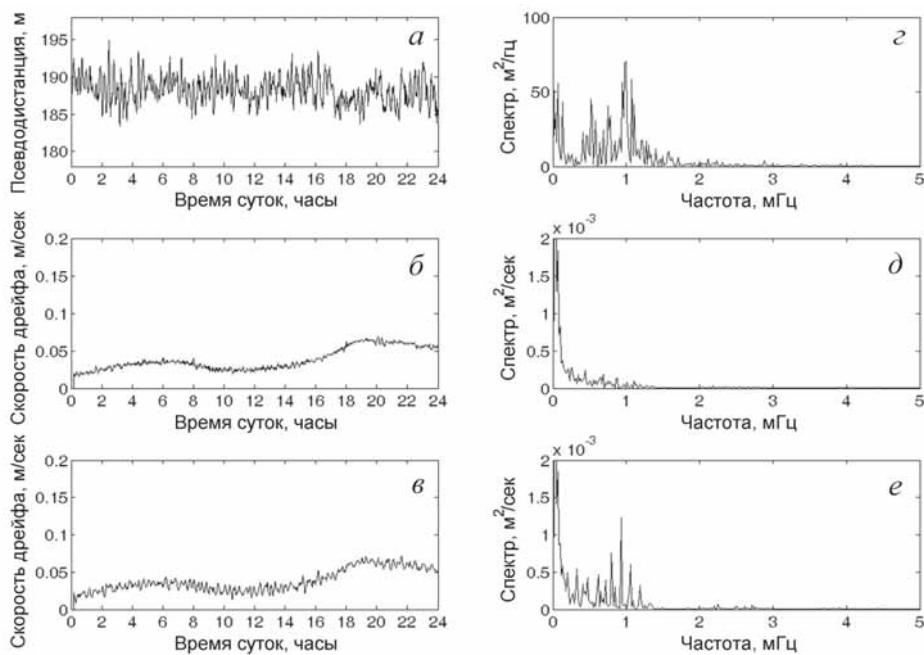


Рис. 3. Временные ряды (*а, б, в*) и спектры мощности (*г, д, е*) псевдодистанции (*а, г*), скорости дрейфа основного GPS-приемника (*б, д*) и дополнительного GPS-приемника (*в, е*)

Попытки обнаружить соответствующие гармоники в спектре мощности скорости дрейфа для каждого из GPS-приемников дали неожиданный результат — спектры мощности основного и дополнительного приемников в этом диапазоне частот отличаются более чем на порядок, что можно видеть на рис. 3 *д, е*. Спектр основного измерительного канала может быть отнесен к группе нестационарных случайных процессов с преобладанием низкочастотных и инфра-низкочастотных гармоник, что отражает изменчивость естественных процессов в океане, атмосфере и ионосфере. В спектре дополнительного приемника имеет место увеличение мощности в области частот от 0,5 до 2 МГц, что не находит естественного объяснения и связано, вероятно, с возрастанием аппаратных шумов измерений в режиме неуверенного приема сигналов навигационных спутников. При этом мощность аппаратных шумов в спектре переменной дистанция составляет около 50 % суммарной мощности спектра, что оказывает пропорциональное влияние на дисперсию рассеяния точек и оценку точности позиционирования. Это означает в частности, что полученные 2DRMS-оценки являются завышенными и можно надеяться на значительное улучшение оценок за счет устранения шумов GPS-приемников на этапе калибровки измерительных каналов при установке оборудования.

Для количественного сравнения измерительных каналов GPS-приемников был разработан метод оценивания абсолютной погрешности позиционирования для каждого из каналов в отдельности. По сравнению с береговыми наблюдениями его особенность состоит в том, что мы не знаем истинного положения подвижного носителя и у нас нет референц-точки для оценки ошибки измерений. Однако в условиях стационарного дрейфа или при незначительных отклонениях от него мы можем рассчитать достаточно гладкую референц-траекторию дрейфа и относительно нее определять ошибку позиционирования. Для расчета референц-траектории

были выбраны сегменты записи, не содержащие явных возмущений. Эти сегменты были пропущены через низкочастотный фильтр Баттерворта 6-го порядка с периодом среза около одного часа, и далее путем пространственно-временной интерполяции были определены референц-позиции для каждой точки исходного ряда. Ошибка GPS-измерений определялась как псевдодистанция от исходной точки ряда до вычисленной референц-точки. В соответствии с предложенным алгоритмом такая оценка может быть определена как оценка ошибок абсолютного позиционирования в ограниченной полосе частот, в данном случае в полосе частот более 0,3 МГц. Предлагаемая оценка включает дисперсию измерений практически всех технических шумов в антенне, кабеле, приемнике, в конфигурации навигационных спутников, так же как и естественных шумов, с периодом менее одного часа. И вследствие преобладания технических шумов эта оценка далее называется аппаратурной. Как видно из рис. 1 б, суммарная дисперсия аппаратурных шумов составляет около 75 % полной дисперсии оценок псевдодистанции.

На рис. 4 а показана гистограмма распределения погрешности измерения позиции для дополнительного GPS-приемника, так же как и МНК-оценка плотности распределения вероятности в приближении гамма-функции. Для сравнения здесь же представлена МНК-оценка плотности распределения вероятности для основного GPS-приемника и в текстовом формате – параметры Гамма-распределений для обеих МНК-оценок. Аналогичные расчеты были выполнены по частным законам распределения вдоль ортогональных географических координат в нормальном приближении, и полученный результат представлен на рис. 4 б в форме двумерной эллиптической диаграммы распределения ошибок измерений 95 % обеспеченности. Внутренний эллипс с главными полуосьми 1,66 м по долготе и 2,28 м по широте соответствует оценкам погрешности основного GPS-приемника. Внешний эллипс с главными полуосьми 3,58 м по долготе и 3,54 м по широте соответствует оценкам погрешности дополнительного GPS-приемника.

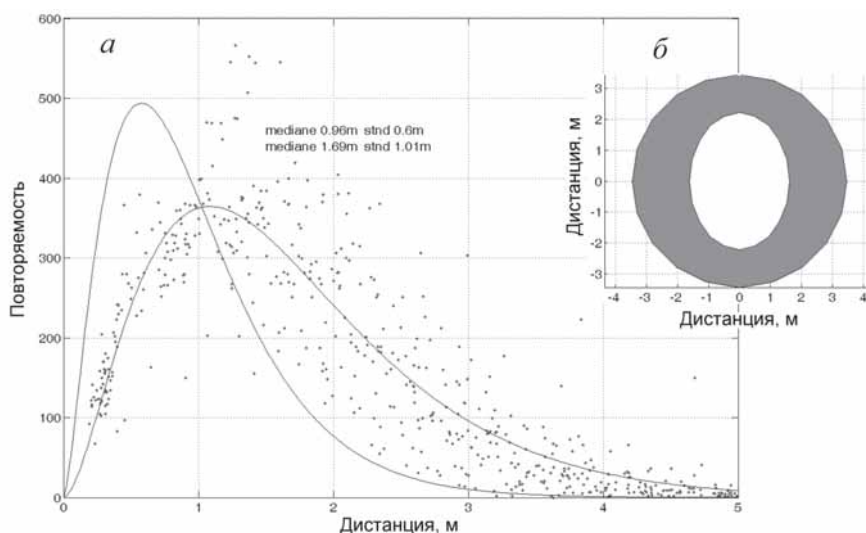


Рис. 4. Диаграммы калибровки GPS-приемников:

*a* – гистограмма распределения ошибок позиционирования для дополнительного GPS-приемника в полосе частот более 0,3 МГц и соответствующие функции плотности распределения в гамма-приближении для двух GPS-приемников; *б* – 95 % эллипсы концентрации ошибок позиционирования в полосе частот более 0,3 МГц для основного (белый) и дополнительного (серый) GPS-приемников

Сравнение медиан Гамма-распределений и двумерных диаграмм ошибок измерений показывает, что измерительный канал дополнительного GPS-приемника сильно шумит и в случае устранения избыточного шума следует ожидать пропорционального уменьшения 2DRMS-ошибки относительных измерений с 4 м до 2,5...3 м, так же как и дисперсии аппаратных шумов с 75 % до 40 % от полной дисперсии. Косвенное сравнение оценок, полученных методом референц-траектории, с результатами береговых измерений дает качественное совпадение по двум позициям. Во-первых, и в том и в другом случае имеет место Гамма-распределение ошибок измерений. А во-вторых, оценки Гамма-распределения с медианой около 0,96 м для аппаратной погрешности измерений вполне сравнимы с оценками полной погрешности, полученными на немецкой антарктической станции *Neumayer*, с медианой Гамма-распределения 2,8 м (частное сообщение). Отметим, что меридиональная полуось внутреннего эллипса погрешности GPS-измерений на рис. 4 б составляет около 2 м, что близко к ошибкам округления по широте для GPS-приемников второго поколения. Это дает основание полагать, что аппаратная ошибка GPS-приемников третьего поколения может быть несколько меньше.

Низкочастотная компонента дисперсии псевдодистанции с периодом более одного часа связана, в основном, с флуктуациями естественных геофизических полей и их влиянием на процесс GPS-измерений. На рис. 5 а, б показаны выборочные десятисуточные фрагменты псевдодистанции, в том числе низкочастотная компонента, полученная с помощью фильтра Баттерворта 6-го порядка. Здесь можно видеть суточную и полусуточную компоненты, флуктуации с периодом от одного часа до шести часов, так же как и отдельные неперiodические выбросы с интенсивностью до 5 м. Вследствие этого исследование влияния естественных процессов на точность GPS-измерений требует длинных рядов исходных данных и привлечения статистического аппарата для анализа нестационарных случайных процессов.

На рис. 5 в, г показана зависимость стандартной ошибки измерений псевдодистанции от интервала усреднения исходного ряда данных, суммарная продолжительность которого составляла около 80 дней. Для скользящего усреднения был использован низкочастотный фильтр Баттерворта 6-го порядка, частота среза которого изменялась в широком временном диапазоне от 2 до 60 мин – рис. 5 в и от 1 до 40 ч – рис. 5 г. Практически все анализируемые временные ряды имели нормальный закон распределения, что подтверждало достаточность длины исходного ряда для получения устойчивых статистических оценок. Это позволило в качестве меры ошибки измерений использовать стандартное отклонение каждого из нормальных распределений, пример которых был показан на рис. 1 б. При этом 95 % точность оценивания стандартного отклонения составляет около 1 см. Анализ зависимости позволил выделить наиболее характерные участки изменчивости стандартной ошибки измерений. В частности, при усреднении на интервале до 10 мин ошибка измерений практически не меняется из-за сильной корреляции шумов. При усреднении на интервале от 10 до 30 мин имеет место уменьшение ошибки примерно на 0,5 м, что связано, вероятно, с вычислительными флуктуациями за счет изменчивости конфигурации навигационных спутников. При усреднении на интервале от 30 мин до 28 ч имеет место, в основном, экспоненциальное уменьшение ошибки вплоть до 0,3 м с небольшими отклонениями от экспоненты в области полусуточной и суточной гармоник. И далее на интервале усреднения более 28 ч имеет место равномерное уменьшение ошибки с наклоном около 2,5 см в сутки. Полученная зависимость позволяет прогнозировать точность GPS-измерений и планировать полевые эксперименты в условиях медленной кинематики, как, например, при исследовании ледников. В частности, для получения дециметровой точности относительных измерений необходимо проводить усреднение исходных данных как минимум на суточном интервале, а для достижения сантимет-



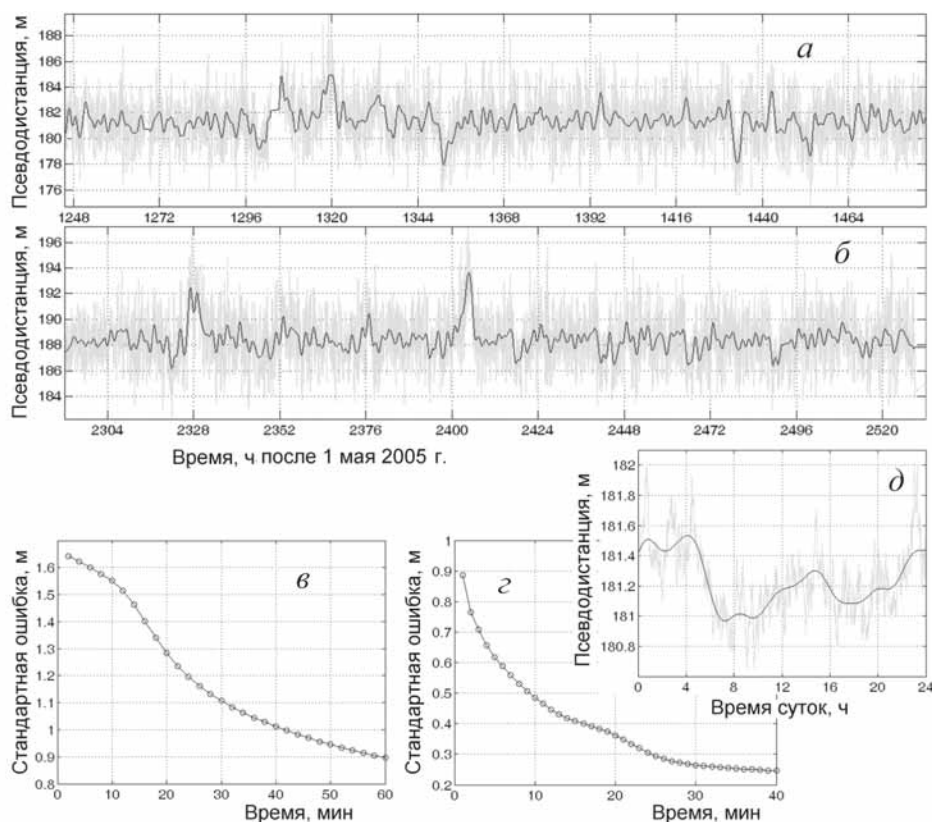


Рис. 5. Десятисуточные выборки оценок псевдодистанции. *a* – 21–31 июня 2005 г.; *б* – 4–14 августа 2005 г., до и после фильтрации – серые и черные линии соответственно, стандартная ошибка сглаженных оценок в зависимости от интервала сглаживания – (*в*, *г*), среднесуточный ход оценок псевдодистанции – (*д*)

ровой точности – на интервале 7–10 суток. Вероятно, эти оценки могут быть несколько лучше, если использовать калиброванные GPS-приемники третьего поколения, и значительно лучше в случае использования профессионального оборудования. При анализе данных была обнаружена среднесуточная изменчивость оценок псевдодистанции, временной ход которой показан на рис. 5 *д*, откуда видно, что различие между ночными и утренними измерениями псевдодистанции может составлять около 0,5 м.

Анализ погрешности относительного позиционирования, представленный выше, основан на синхронных измерениях двумя GPS-приемниками со сдвигом в пространстве. При измерениях скорости дрейфа обычно используют два последовательных измерения одного GPS-приемника, так, что имеет место сдвиг как в пространстве, так и во времени. Поскольку спутниковая навигационная система имеет самые высокие стандарты по времени, измерение скорости в итоге сводится к измерению дистанции между последовательными точками, однако временной фактор оказывает косвенное влияние через флуктуации параметров системы, вызывая увеличение суммарной дисперсии измерений. В GPS-приемниках есть еще возможность измерения скорости по сдвигу частоты Доплера, однако этот метод в предлагаемой работе не рассматривается.

На рис. 6 *a, б, в* показаны примеры вычисления скорости и направления дрейфа по данным дрейфующей станции СП-35 от 28 ноября 2007 г., когда в течение 12 часов произошел быстрый разворот дрейфа и ледяное поле было расколото.

На рис. 6 *г* представлена демонстрационная статистическая модель GPS-измерений скорости дрейфа, где каждая из последовательных измерительных точек моделируется случайным множеством точек с эмпирическим Гамма-распределением, а смещение между ними равно удвоенной медиане распределения. При этом псевдодистанция между парными точками случайного множества при малых смещениях также имеет Гамма-распределение, которое с увеличением смещения вырождается в нормальное распределение, а дисперсия оценок скорости дрейфа уменьшается за счет пропорционального увеличения интервала измерения. Так, оценки скорости дрейфа на рис. 6 *a* соответствуют модели на рис. 6 *г* в масштабе 1:12, поскольку при средней скорости дрейфа около 5 см/с смещение на интервале измерения 1 мин составляет около 3 м, что примерно равно двум медианам эмпирического Гамма-распределения на рис. 4 *a*. А оценки скорости и направления дрейфа на рис. 6 *б* и 6 *в*, полученные при увеличении измерительного интервала до 8 мин, соответствуют смещению в 16 медиан эмпирического Гамма-распределения. Сравнение оценок показывает 8-кратное уменьшение модельной погрешности, в результате чего на рис. 6 *б, в* можно видеть флуктуации сигнала в области частот 0,5–2 мГц, которые ранее были неразличимы.

Представленные оценки скорости дрейфа содержат также ошибки округления вычислений, которые проявляются в квантовании сигналов по амплитуде. При этом шаг квантования зависит как от интервала измерений, так и от направления

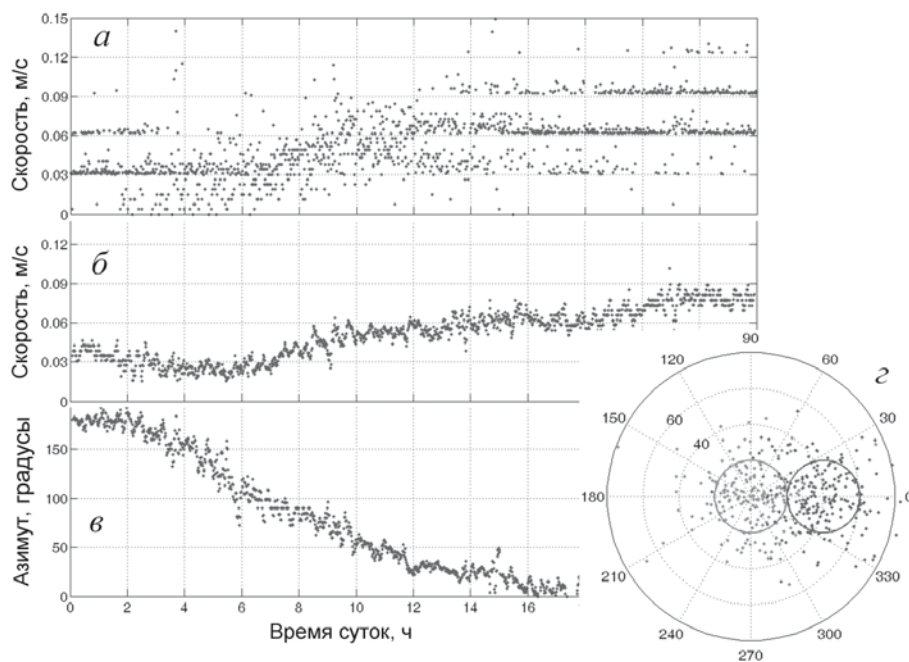


Рис. 6. Пример вычислений скорости и направления дрейфа по данным дрейфующей станции СП-35 от 28 ноября 2007 г., интервал регистрации данных – 1 мин, интервал вычисления скорости 1 мин – (*a*) и 8 мин – (*б, в*); *г* – статистическое моделирование GPS-измерений скорости дрейфа с помощью двух Гамма-распределений (точки) с медианой 18 м (окружности), дисперсией 144 м<sup>2</sup> и смещением 36 м

дрейфа, имея максимальное значение для скорости дрейфа в направлении север-юг, а для азимута в направлении запад-восток. Как было показано выше, ошибка округления позиции по широте является преобладающей и составляет 1,852 м, а все ошибки квантования являются дочерними и вычисляются по простым соотношениям. Так, для скорости дрейфа при интервале измерения 1 мин шаг квантования равен  $1,852 \text{ м}/60 \text{ с} = 30,9 \text{ мм/с}$ , при интервале измерения 8 мин –  $1,852 \text{ м}/480 \text{ с} = 3,85 \text{ мм/с}$ , а соответствующий шаг квантования по азимуту в сильной степени зависит от смещения (читай скорости дрейфа) и составляет для заданных условий около  $5^\circ$ . Отметим, что в поперечном направлении эффект квантования проявляется значительно слабее, однако в любом случае он является важным элементом прецизионных измерений.

Для анализа некоррелированных ошибок измерений скорости дрейфа и их зависимости от интервала измерений был выполнен регрессионный анализ соответствующих оценок двух измерительных каналов, разнесенных на дистанцию около 181 м. В данном случае в качестве меры погрешности измерений скорости используется стандартная ошибка регрессии оценок пройденной за интервал измерения дистанции. В таблице ниже представлены оценки стандартной ошибки регрессии, некоррелированные ошибки измерений скорости дрейфа и ошибки округления вычислений, полученные как для различных интервалов измерений, так и для различной скорости и направления дрейфа. Эти оценки показывают, что при уменьшении интервала измерений до периода менее 10 мин имеет место значительное уменьшение некоррелированных шумов, что, вероятно, связано с повышением стабильности конфигурации навигационных спутников на интервале измерения. А при возрастании интервала измерения преобладают ошибки округления.

Таблица 1

**Зависимость ошибки регрессии, некоррелированных ошибок измерения скорости дрейфа и округления вычислений от временного интервала измерений.**

Интервал измерений, мин	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	20
Станд. ошибка регрессии, м	0,8	1,14	1,35	1,49	1,62	1,72	1,79	1,87	1,9	1,91	1,9
Станд. ошибка скорости, см/с	1,33	0,95	0,75	0,62	0,54	0,48	0,43	0,39	0,35	0,32	0,17
Ошибка округления, см/с	3,09	1,55	1,03	0,98	0,62	0,52	0,44	0,37	0,34	0,31	0,16

Детальный анализ оценок псевдодистанции, так же как и ошибок относительного позиционирования, позволил получить статистически обеспеченные оценки скорости дрейфа и ускорений ледяного поля и вследствие этого наметить пути к оценкам ледовых сил, действующих в ледяном покрове. После низкочастотной фильтрации исходных временных рядов и подавления флуктуаций, связанных с изменчивостью конфигурации навигационных спутников, удалось снизить среднюю погрешность измерений ускорений ледяного поля до  $0,25 \text{ мкм/с}^2$  или  $0,25 \text{ мГал}$ , что позволяет исследовать в первом приближении распределение внешних сил, действующих на ледяное поле вдоль траектории его дрейфа. На рис. 7 а, б представлены диаграммы распределения ускорений вдоль траектории дрейфа ледяного поля дрейфующей станции СП-33 при торошении 16 июля 2005 г. и ледяного поля дрейфующей станции СП-35 в момент разлома 28 ноября 2007 г. Ниже на рис. 7 в представлены графики изменчивости ускорений и скорости дрейфа для первого события. Как видно из рисунков, при активных динамических событиях в ледяном покрове преобладает хаотическое распределение внутренних ледовых сил, а интенсивность локальных ускорений значительно превосходит ускорения, связанные с крупномасштабным воздействием ветра и течений. Вероятно, именно мелкомасштабные и мезомасштабные внутренние силы, их перераспределение и самоорганизация определяют эволюцию процессов разрушения в ледяном покрове.

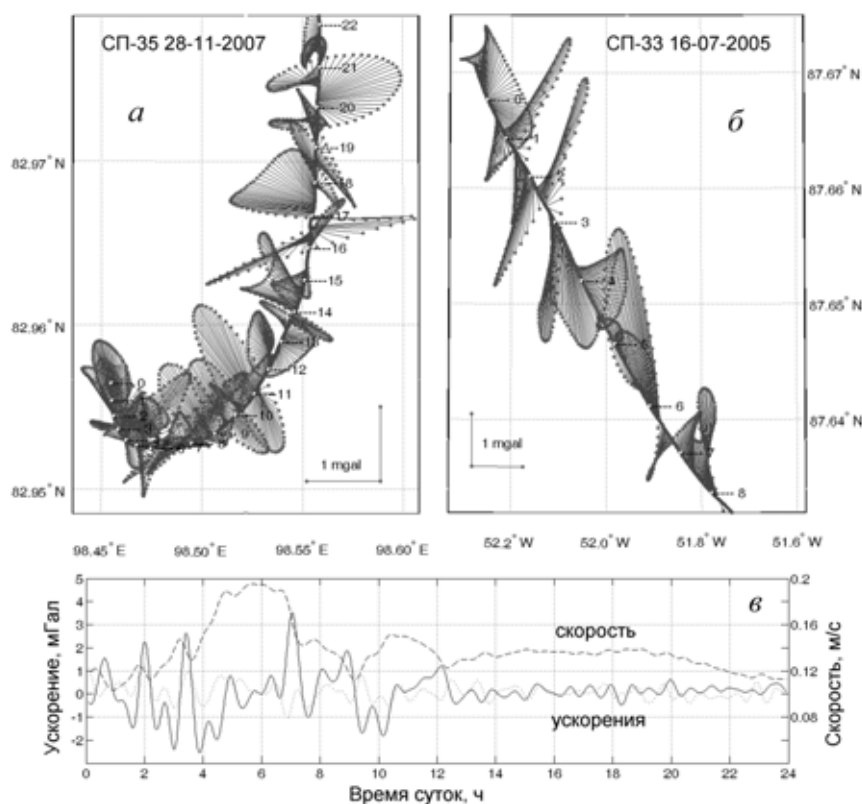


Рис. 7. Диаграммы распределения интенсивности и направления ускорений вдоль траектории дрейфа, СП-35 28 ноября 2007 г. – разлом ледяного поля – (а), СП-33 16 июля 2005 г. – торшение – (б); в – график ортогональных проекций ускорений и скорости дрейфа по данным СП-33 16 июля 2005 г.

Такая динамика ледяного покрова является вполне объяснимой и даже типичной с точки зрения механики дискретно иерархических сред [3].

Мы надеемся, что представленный анализ и некоторые его результаты будут способствовать оптимальному решению проблемы планирования полевых экспериментов с использованием спутниковых навигационных систем, так же как и расширят наши возможности по изучению механики деформирования и разрушения морского льда.

*В статье представлены некоторые результаты, полученные во время работы по проекту 1.5.4. ЦНТП Росгидромета за 2007 г. Авторы благодарны участникам и руководителям проекта российских дрейфующих станций СП-33 и СП-35 В.Т.Соколову и А.А.Висневскому за сотрудничество и поддержку, а также руководителю отдела автоматики и приборов АНИИ Р.А.Балакину за внимание к работе и полезные дискуссии.*

#### СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Антонович К.М. Использование спутниковых радионавигационных систем в геодезии. Новосибирск: Наука, 2005. 334 с.

2. Крамер Г. Математические методы статистики / Под ред. А.Н.Колмогорова. М.: Мир, 1975. 648 с.
3. Садовский М.А. Дискретные свойства геофизической среды. М.: Наука, 1989. 176 с.
4. Серапинас Б.Б. Основы спутникового позиционирования. М.: Изд-во МГУ, 1998. 82 с.
5. Смирнов В.Н. Динамические процессы во льдах. СПб.: Гидрометеониздат, 1996. 162 с.
6. Стеблов Г.М., Фролов Д.И., Куксенко В.С. Кинематика движения материков Земли // Физика твердого тела. 2005. Т. 47. Вып. 6. С. 1009–1014.
7. Vinnins M., Lachapelle G., Cannon M.E., Dosso S., Heard G. High Latitude Altitude // GPS World, October 2003. P. 16–27.
8. Hofmann-Wellenhof B., Lichtenegger H., Collins J. Global Positioning System theory and practice. Fifth, revised edition. Wien, New-York: Springer-Verlag, 2001. 382 p.
9. Hvidberg C.S., Gundestrup N., Keller K., Jonsson P. Ice-divide flow at Hans Tausen Iskappe, North Greenland, from surface movement data. // J. of Glaciology. 2001. Vol. 47. № 156. P. 78–84.
10. Hvidberg C.S., Keller K., Forsberg R. Mass Balance and Surface Movement of the Greenland Ice Sheet at Summit, Central Greenland // Geophysical Research Letters. 1997. Vol. 24. № 18. P. 2307–2310.
11. Rigor I.G., Hudson E.T., Loyning T., Priamikov S. The International Arctic Buoy Programme (IABP) // Proc. ACSYS/CLIC Final Meeting, St. Petersburg, Nov. 2003. 200 p.

*I.B.SHEYKIN, V.N.SMIRNOV, S.M.KOVALEV*

#### **ACCURACY ESTIMATION OF GPS-MEASUREMENTS ON THE RUSSIAN DRIFTING STATIONS «NORTH POLE-33» AND «NORTH POLE-35»**

*There are difficult to estimate realistically the distance and velocity errors of GPS-measurements in the conditions of the ice drifting station. The presented paper includes some developments for solution this problem. At the summer 2005 the detail GPS-measurements are conducted in the high latitudes of Arctic Ocean. Two usual GPS-receivers were deployed into the consolidated ice floe on the distance about 185 meters and fix a position every minute.*

*The analysis of the field data allows investigate 2D distributions of pseudo-distance vector between measured points as well as the standard error of velocity estimations. The Gaussian PDF and confidence ellipses of concentration are used for interpretation of the 2D pseudo-position cloud and the regression parameters are used for estimations of velocity standard error. We have found that the regression standard errors are depended strongly of sampling interval because the GPS-receivers are calculating their positions from the some GPS-satellites at the short intervals and from the different GPS-satellites at the intervals more than 10 minutes. There are similar to the pseudo-differential conditions of GPS-measurements. The study examined a nonlinear relationship between velocity standard error and sampling interval for the pseudo-differential range as well as the range limits. The potential sources of measured errors are discussed.*

*Probably in situ calibration of GPS-measurements and monitoring of GPS-measurement errors will be useful for planning of investigations in the high latitude conditions.*