

УДК 629.783:004.457

DOI: 10.33764/2411-1759-2020-25-3-72-88

## АНАЛИЗ КАЧЕСТВА СПУТНИКОВЫХ ИЗМЕРЕНИЙ С ПОМОЩЬЮ ПРОГРАММНОЙ УТИЛИТЫ TEQC

*Вячеслав Евгеньевич Терещенко*

Сибирский государственный университет геосистем и технологий, 630108, Россия, г. Новосибирск, ул. Плахотного, 10, аспирант, тел. (953)766-70-14, e-mail: taboretzvigyn@mail.ru

Выполнены анализ и оценка качества измерений глобальных навигационных спутниковых систем (ГНСС), полученных с пунктов сетей дифференциальных геодезических станций (ДГС) различных уровней: региональной сети ДГС Новосибирской области (ДГС НСО); государственной фундаментальной астрономо-геодезической сети (ФАГС); глобальной сети Международной ГНСС-службы (МГС). Показана актуальность использования различных региональных (коммерческих, отраслевых) сетей ДГС в опорной геодезической основе государства при формировании единой системы координатно-временного обеспечения. В статье приведены результаты оценки качества ГНСС-измерений по следующим основным критериям: количество отбракованных измерений, ионосферная задержка, эффект многопутности, отношение «сигнал – шум», сдвиги шкал времени часов приемника относительно часов спутника. Оценены основные погрешности, влияющие на качество приема спутниковых измерений, и сделаны выводы о возможности включения сети ДГС Новосибирской области в один из уровней опорной геодезической сети. Сравнение качества ГНСС-измерений пунктов сетей различного уровня показало, что по всем критериям оценки качества ГНСС-измерения, выполняемые на пунктах сети ДГС Новосибирской области, не уступают измерениям, выполняемым на пунктах ФАГС, а также по всем критериям, за исключением отношения «сигнал – шум», соответствуют измерениям, проводимым на пунктах сети МГС.

**Ключевые слова:** глобальные навигационные спутниковые системы, ГНСС-измерения, дифференциальная геодезическая станция, анализ качества ГНСС-измерений, программная утилита Teqc, спутниковая геодезическая сеть.

### *Введение*

По состоянию на 2019 г. в Российской Федерации насчитывается более 2 000 дифференциальных геодезических станций, установленных и обслуживаемых различными коммерческими и государственными геодезическими компаниями [1–4], и их количество растет. Это связано с тем, что развитие сетей дает возможность эффективнее выполнять геодезические и маркшейдерские измерения, топографические съемки, инженерные изыскания и прочие виды геодезических работ.

Другой, не менее важной целью создания сетей спутниковых ДГС может стать закрепление единого координатно-временного и навигационного обеспечения (КВНО) на территории государства. Таким образом, современные геодезические сети ДГС одновременно можно отнести к двум сегментам единой системы КВНО: решение фундамен-

тальных задач и формирование искусственных навигационных полей [5].

Среди проблем использования ДГС в России, упомянутых в работах [6–9], остро стоит проблема недостаточного количества ДГС в составе государственной геодезической сети, реализующих координатную основу ГСК-2011. По данным Федерального научно-технического центра геодезии, картографии и инфраструктуры пространственных данных (ЦГКиИПД) [10], к началу 2020 г. количество пунктов фундаментальной астрономо-геодезической сети составляет 53. Такое количество не позволяет осуществлять привязку объектов при выполнении различных видов геодезических работ к координатной основе ГСК-2011 на большей части территории страны с той точностью, с которой она создана [11]. В то же время множество региональных ДГС, входящих в различные не связанные между собой коммерческие геодезические сети,

не способствует установлению единой однородной общегосударственной структуры. Региональные сети ДГС позволяют решать задачи, связанные с формированием единой системы КВНО и задачи региональной геодезии посредством анализа поля смещений пунктов, вызванных естественными геофизическими процессами [12]. Включение таких ДГС в общую структуру формирования государственной координатной основы может принести большую пользу профессиональному и научному геодезическому сообществу.

Однако в России в настоящее время не приняты нормативно-технические документы, регламентирующие развертывание, уравнивание и применение сетей ДГС. Это позволяет различным геодезическим компаниям устанавливать пункты с постоянно действующим оборудованием удобным для себя способом, с приемлемой для собственных нужд точностью [13] и уравнивать сети пунктов в системах координат, зачастую отличных от государственных.

Несмотря на различия в уровнях сетей ДГС и системах координат, в которых составлены каталоги координат, их основной задачей является прием радиосигналов от навигационных космических аппаратов (КА) для передачи точных координат на требуемые участки геодезических работ. Современные пункты ДГС расположены в зоне широко открытого радиогоризонта, вдали от границ тектонических плит, посторонних источников радиоизлучения и прочих источников погрешностей, влияющих на качество позиционирования. Такие условия соблюдены как для пунктов Международной ГНСС службы (МГС, англ. – International GNSS Service), так и для пунктов ФАГС и различных региональных сетей ДГС. Анализ и сравнение качества ГНСС-измерений, полученных с пунктов таких сетей, поможет сделать выводы о возможности использования пунктов региональных сетей ДГС в качестве вспомогательного элемента при формировании единой государственной системы КВНО России.

### Постановка задачи

В работе [14] предлагается структура единой геодезической координатной основы, создание которой достигается путем объединения и уравнивания существующих сетей ДГС, таких как ФАГС, высокоточная геодезическая сеть, различные наземные навигационные системы и региональные, коммерческие или отраслевые сети ДГС. Для реализации единой геодезической координатной основы в публикациях [5, 14] предлагается создание двухуровневой структуры опорной геодезической сети (ОГС).

Первый уровень должен обеспечивать решение задач КВНО и геофизических наблюдений с наивысшей точностью и максимальной оперативностью путем объединения следующих элементов:

- фундаментальная астрономо-геодезическая сеть;
- высокоточная геодезическая сеть;
- сертифицированные региональные сети референцных станций (ДГС-1)\*;
- наземные навигационные системы (ННС-1) типа Locata.

Второй уровень ОГС является, в большей степени, вспомогательным и обеспечивает дублирование функций сети первого уровня для повышения надежности формирования единой системы КВНО.

Этот уровень включает:

- спутниковую геодезическую сеть 1-го класса (СГС-1);
- классическую астрономо-геодезическую сеть 1–4-го класса (АГС);
- ДГС, не прошедшие сертификацию (ДГС-2 – «станции-кандидаты»);
- наземные навигационные системы типа eLoran (ННС-2).

В перспективе такой подход позволит создать в России современную высокоточную координатную основу и значительно повысить эффективность реализации единой системы КВНО России.

\* В работах [5, 14] вместо термина «дифференциальная геодезическая станция» использован термин «постоянно действующая базовая станция».

Критерии включения ДГС в тот или иной уровень ОГС многочисленны.

К основным относят: способ установки ГНСС-оборудования; тип и уровень точности аппаратуры; геодинамическую активность района; метеорологические условия и прочие факторы, влияющие на качество принятия радиосигнала.

Существует ряд обязательных и рекомендуемых требований для пунктов, входящих в сеть МГС, изложенных в директиве [15]. Соблюдение таких требований при развертывании сетей ДГС в России создаст условия для формирования высокоточной и стабильной системы КВНО, и, возможно, интеграции таких сетей или их фрагментов в Международную земную отсчетную основу (International Terrestrial Reference Frame). Для пунктов ФАГС и пунктов региональных сетей ДГС не все требования соблюдены.

Например, часть 2.1.15 в директиве [15] содержит следующее обязательное требование: «...следует избегать установки антенн на крышах зданий или сооружений, за исключением особых обстоятельств, которые следует обсудить с Центральным бюро МГС». Однако целью данной работы стоит сравнение качества ГНСС-измерений, полученных с пунктов региональной сети ДГС, пунктов ФАГС и пунктов сети МГС в уже сложившейся ситуации. На основании анализа качества ГНСС-измерений с пунктов региональных сетей ДГС, а также сравнения качества с измерениями, полученными с пунктов сетей национального и глобального масштаба, можно дать рекомендацию о включении отдельных ДГС или сетей ДГС в первый или второй уровень ОГС (ДГС-1 или ДГС-2).

В ходе исследования был проведен анализ и сравнение качества ГНСС-измерений, полученных с пунктов сетей ДГС Новосибирской области (ДГС НСО), ФАГС и МГС, с помощью свободно распространяемой программной утилиты Teqc, разработанной и поддерживаемой компанией University Navstar Consortium (UNAVCO), США.

### **Программная утилита Teqc**

Программная утилита Teqc предназначена для трансформирования, редактирования,

проверки и оценки качества спутниковых измерений. Название утилиты соответствует функциям, которые она выполняет: преобразование (Translating), редактирование (Editing) и проверка (оценка) качества (Quality Checking) ГНСС-измерений. Утилита Teqc не интерактивная: для выполнения всех действий используется интерфейс командной строки.

В ходе проверки и оценки качества утилитой Teqc вычисляются некоторые показатели качества входных данных и указываются проблемы с ГНСС измерениями, записанными в файлах. Утилита Teqc может оценить качество приема сигналов ГНСС и проверять режим работы приемника с использованием данных других приемников. Teqc читает формат RINEX и множество сырых двоичных форматов.

Опция проверки качества дополнительно использует данные эфемерид КА в навигационных файлах для улучшения результатов оценки качества ГНСС-измерений. Данная опция позволяет оценить качество радиосигнала во время обнаружения каждого КА, сформировать сводную таблицу статистики и создать полный отчет об оценке качества, учитывая влияние эффекта многопутности, ионосферную задержку, отношение полезного сигнала к радиошуму, и прочие поддающиеся численной оценке виды погрешностей [16].

### **Ход работы**

В ходе проведения исследования с помощью программной утилиты Teqc были проанализированы ГНСС-измерения 19 пунктов сети ДГС НСО, 18 пунктов ФАГС и 20 пунктов сети МГС, на предмет качества приема спутниковых измерений. Все измерения, участвующие в исследовании, получены на почти годовом интервале с 01.01.2018 по 16.12.2018. В обработку принимались 24-часовые файлы измерений дискретностью 30 секунд. Файлы, имеющие пробелы в принятии сигналов более 10 % от суточного интервала, были исключены из обработки. Количество включенных в обработку суточных файлов измерений составило от 7 до 10 в каждом месяце 2018 г. Исключением из этого правила были только пункты сети ДГС НСО, из-



## Результаты оценки качества ГНСС-измерений

### Количество отбракованных измерений

В полном отчете об оценке качества ГНСС-измерений указано общее количество полученных измерений; общее количество измерений, полученных в диапазоне установленной маски возвышения; количество непрерывных измерений, полученных в диапазоне маски возвышения; количество удаленных измерений и другие параметры.

На рис. 2, а приведена гистограмма отношения (вертикальная шкала) количества полных измерений выше маски возвышения к общему числу возможных измерений выше маски возвышения. Маска возвышения установлена на значении 10 градусов. Представленные результаты характеризуют среднегодовое значение отношения. Чем выше это отношение, тем меньше прерывистых измерений и срывов циклов на соответствующем пункте. На гистограммах рис. 3 отношение количества полных измерений к общему числу возможных приведено по каждому месяцу для каждого участвовавшего в исследовании пункта сетей ДГС НСО, ФАГС, МГС. По горизонтальной шкале на всех гистограммах далее приведены четырехзначные идентификаторы пунктов.

Среди факторов, влияющих на снижение качества приема радиосигналов, помимо неоптимальной спутниковой геометрии, расположения пунктов в местах наличия радиопомех или физических препятствий прохождения сигнала, существуют прочие, поддающиеся численной оценке. К ним относятся: задержка прохождения сигнала в ионизированном слое атмосферы, переотражение сигнала от различных предметов (многопутность), отношение принятого приемником сигнала к уровню сопутствующего шума, смещение шкалы часов приемника относительно шкалы часов спутника и другие. По перечисленным факторам далее проведена оценка и сравнение качества принимаемых радиосигналов пунктами сетей ДГС НСО, ФАГС, МГС между собой.

### Ионосферная задержка

Ионосферная задержка – изменение скорости распространения электромагнитного излучения, транслируемого спутником и принима-

емым приемником, при прохождении ионизированной части атмосферы. Ионосферные условия постоянно меняются и влияют на скорость распространения радиосигналов ГНСС. Ионосферная задержка является существенным источником погрешности при обработке спутниковых измерений и зависит от частоты распространения радиосигнала, поэтому вычисления производятся для обеих частот L1 и L2 [19]. Погрешность позиционирования, вследствие задержки радиосигнала в ионосфере, может достигать десятков метров. Она зависит, в первую очередь, от возвышения спутника над горизонтом, так как сигнал от спутника до приемника при малом угле возвышения пересекает более толстый слой ионосферы, чем при угле, близком к зениту. По оценкам [16], у горизонта она в 5 раз выше, чем в зените. Также этот вид погрешности зависит от географической широты расположения приемника, сезона и времени суток измерений, уровня солнечной активности, препятствий на пути радиосигнала и прочих факторов [20].

В полном отчете об оценке качества Тегс приводится диаграмма увеличения погрешности в зависимости от углового возвышения спутника и вычисленное количество срывов циклов фазовых измерений (ionospheric phase slips) на интервалах возвышения от 90–85 до 5–0 градусов. На рис. 2, б представлена гистограмма, на которой схематично показано среднегодовое количество срывов циклов вследствие ионосферной задержки по обеим частотам по каждой станции, выше установленной маски возвышения. На гистограмме (рис. 4) представлено количество срывов, вызванных влиянием ионосферной задержки по каждому месяцу в течение года для каждого пункта сетей ДГС НСО, ФАГС, МГС. Вертикальная шкала гистограмм характеризует количество срывов.

### Многопутность

Эффект многопутности возникает из-за наличия отражающей поверхности возле приемника при трансляции радиосигнала, но иногда возможно отражение сигналов от самого спутника. Не существует общей модели эффекта многопутности из-за непостоянной спутниковой геометрии. Влияние многопутности может быть оценено с помощью вы-

числения скользящего среднего (moving average) по линейным комбинациям кода и фазы несущей на частотах L1 и L2 MP1 и MP2 (это комбинации, характеризующие погрешность в измерениях вследствие эффекта многопутности). MP1 является линейной комбинацией P1, L1 и L2, а MP2 является линейной комбинацией P2, L1 и L2 [21]. Характер изменения эффекта многопутности в зависимости от углового возвышения спутника указывает на то, что сигнал от спутников при малом угле возвышения над горизонтом имеет более высокую вероятность переотражения. Как следствие, погрешность, вызванная влиянием этого эффекта, увеличивается.

В полном отчете об оценке качества Teqc приводится диаграмма, содержащая сводку значений комбинаций многопутности MP1 и MP2 для каждого спутника, и осредненное значение для пункта. В отчете графически и численно представлены распределения значений MP1 и MP2 по интервалам возвышения спутников от 90–85 до 5–0 градусов. Вычисленные комбинации многопутности на частотах L1 и L2 усреднены по всем спутникам для каждой станции. На гистограмме (рис. 2, в) приведены среднегодовые значения MP1 и MP2; на гистограммах (рис. 5) – среднемесячные значения MP1 и MP2 для пунктов сетей ДГС НСО, ФАГС, МГС. По вертикальной шкале отложены значения средних комбинаций многопутности (mean MP1 и mean MP2) в метрах.

#### *Отношение «сигнал – шум»*

Уровень шума в системе приемного ГНСС-оборудования определяет, насколько точно могут быть измерены псевдодальноности и фазы несущей. Качество принятого сигнала тем выше, чем больше отношение уровня сигнала к уровню шума на определенной частоте. Причины низкого отношения «сигнал – шум» могут быть вызваны ионосферными возмущениями, эффектом многопутности, электромагнитной интерференцией, неоптимальным геометрическим положением спутников, различными резонансными явлениями и прочими факторами. Отношение «сигнал – шум» – относительная величина – измеряется по логарифмической шкале, а единицей измерения принят децибел (Дб) [16].

В полном отчете об оценке качества Teqc приведено графическое и численное представление отношения «сигнал – шум» для частот L1 и L2 (SN1 и SN2) в соответствии с интервалами возвышения спутников в Дб; стандартное отклонение (1 сигма); количество измерений –  $n$ , используемых при вычислении SN1 и SN2. На рис. 2, г приведена гистограмма среднегодовых значений отношения «сигнал – шум» для каждого пункта сетей ДГС НСО, ФАГС, МГС, рассчитанных по спутникам выше маски возвышения – SN1 и SN2. На рис. 6 приведены гистограммы отношения «сигнал – шум» для каждого пункта осредненные по каждому месяцу года. По вертикальной шкале отложены единицы измерения отношения «сигнал – шум» в децибелах.

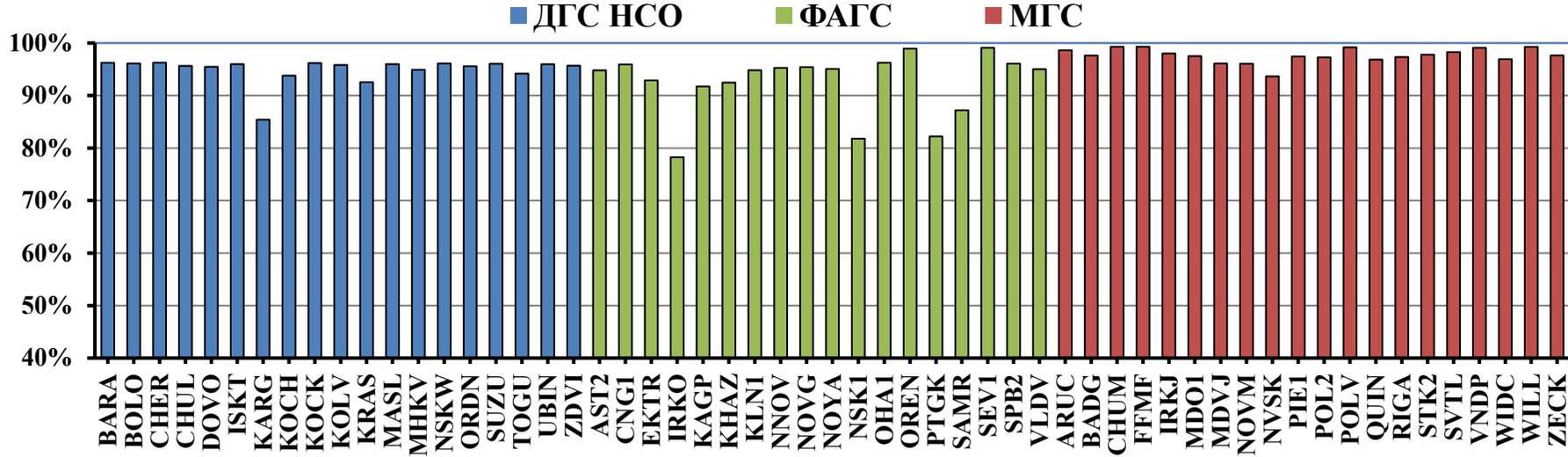
#### *Смещение шкалы времени часов приемника относительно часов спутника*

Полный отчет об оценке качества Teqc показывает смещение шкалы часов приемника в определенных интервалах времени знаками «+» или «-», означающими либо положительный, либо отрицательный миллисекундный сброс часов. Пустая строка означает, что нет сброса часов. В отчете об оценке качества содержатся значения следующих рассчитанных параметров часов приемника: количество обнаруженных миллисекундных сбросов часов приемника (clock offsets); общее смещение часов приемника (clock drift); скорость смещения часов приемника (rate of clock drift); среднее время между сбросами.

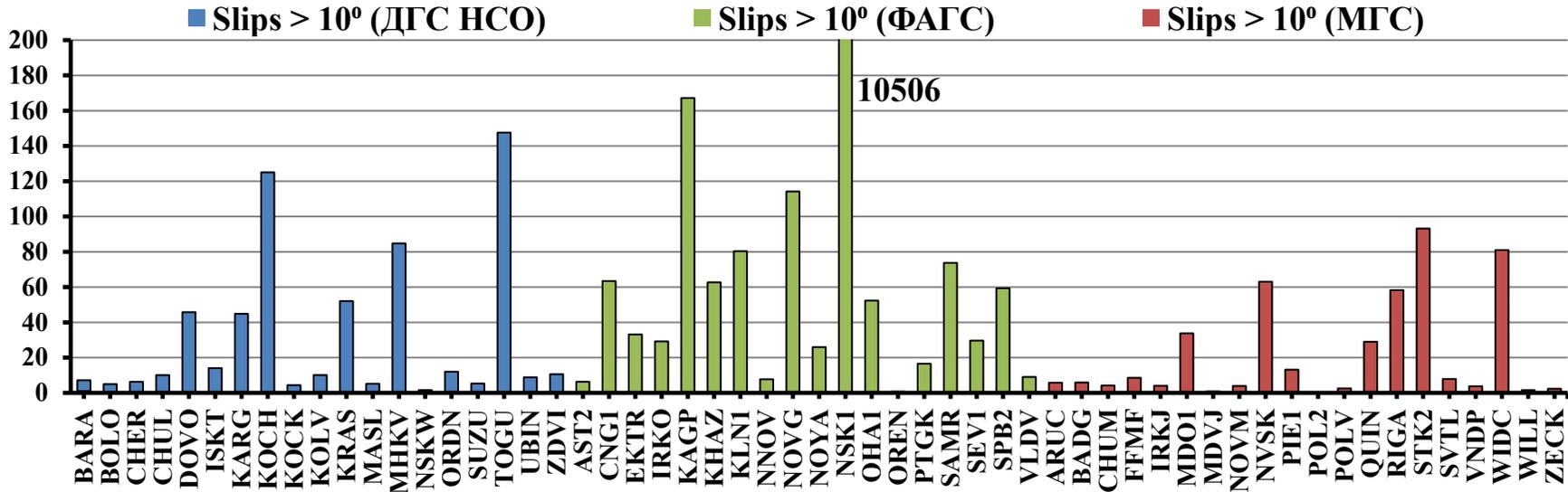
В ходе оценки качества на годовом интервале пунктов сетей ДГС НСО, ФАГС, МГС полный отчет об оценке качества Teqc не показал сбросы часов приемника и смещения шкал часов ни на одном пункте. Поэтому графически этот критерий оценки не представлен.

Представленные на рис. 2 результаты отражают среднегодовые значения перечисленных видов погрешностей по всем пунктам, участвующим в исследовании. Однако с течением времени, под воздействием сезонных флуктуаций и других периодических и эпизодических эффектов (атмосферная, литосферная, антропогенная активность) представленные виды погрешностей могут оказывать воздействие на спутниковые измерения с различной степенью влияния.

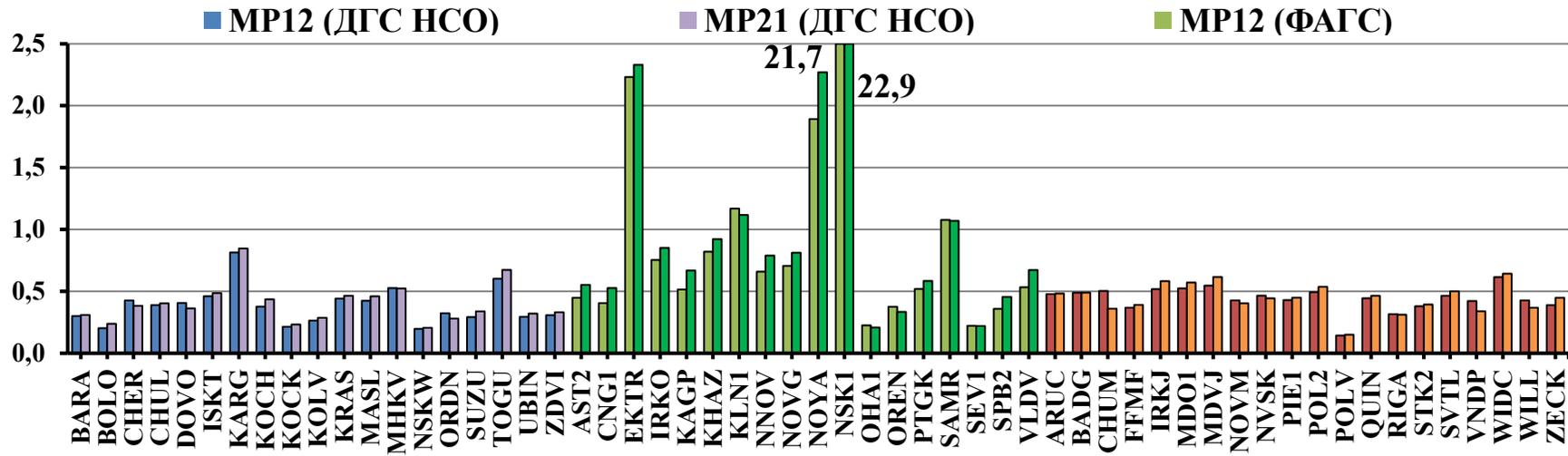
Гистограммы (среднегодовое значение)



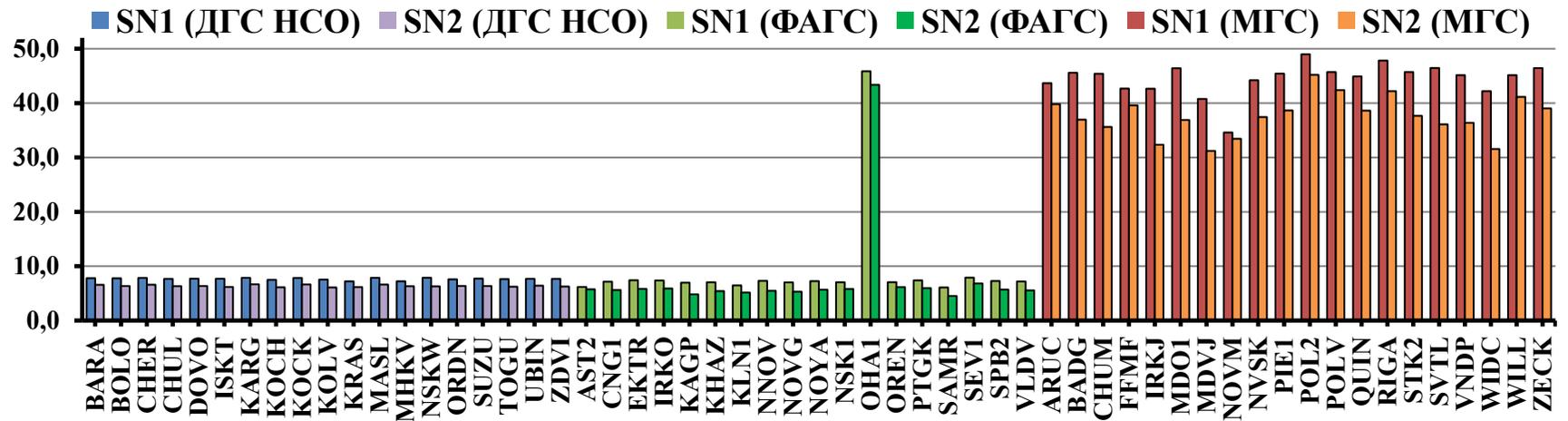
а)



б)



а)



б)

Рис. 2. Гистограммы оценки качества ГНСС-измерений:

а) гистограмма отношения полных измерений к общему числу возможных; б) гистограмма количества срывов, вызванных влиянием ионосферной задержки, выше маски возвышения; в) гистограмма осредненных комбинаций многопутности для частот L1 и L2; г) гистограмма среднего отношения уровня сигнала к уровню шума для частот L1 и L2

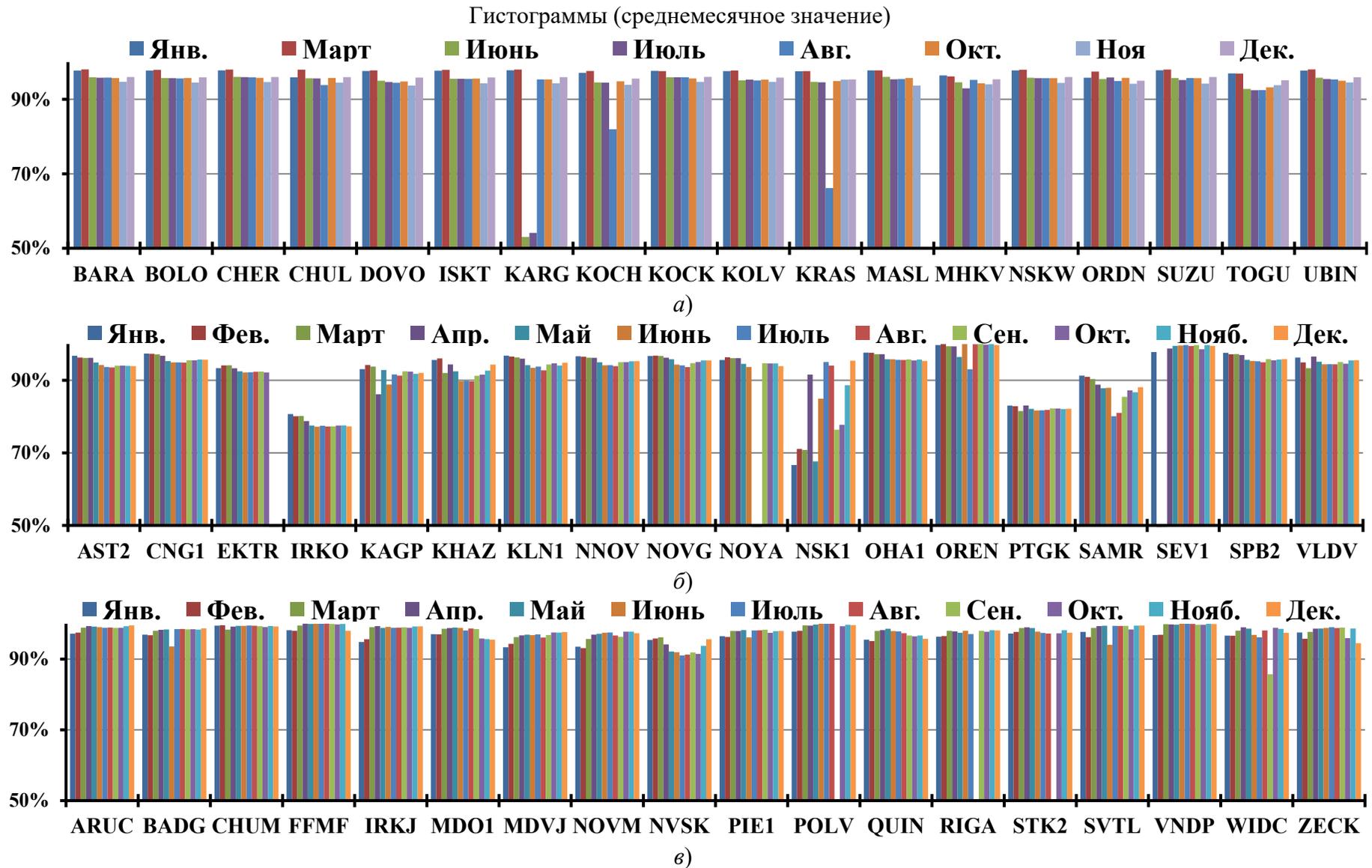


Рис. 3. Гистограммы отношения полных измерений к общему числу возможных в течение года по каждому пункту:  
 а) по пунктам сети ДГС НСО; б) по пунктам ФАГС; в) по пунктам сети МГС

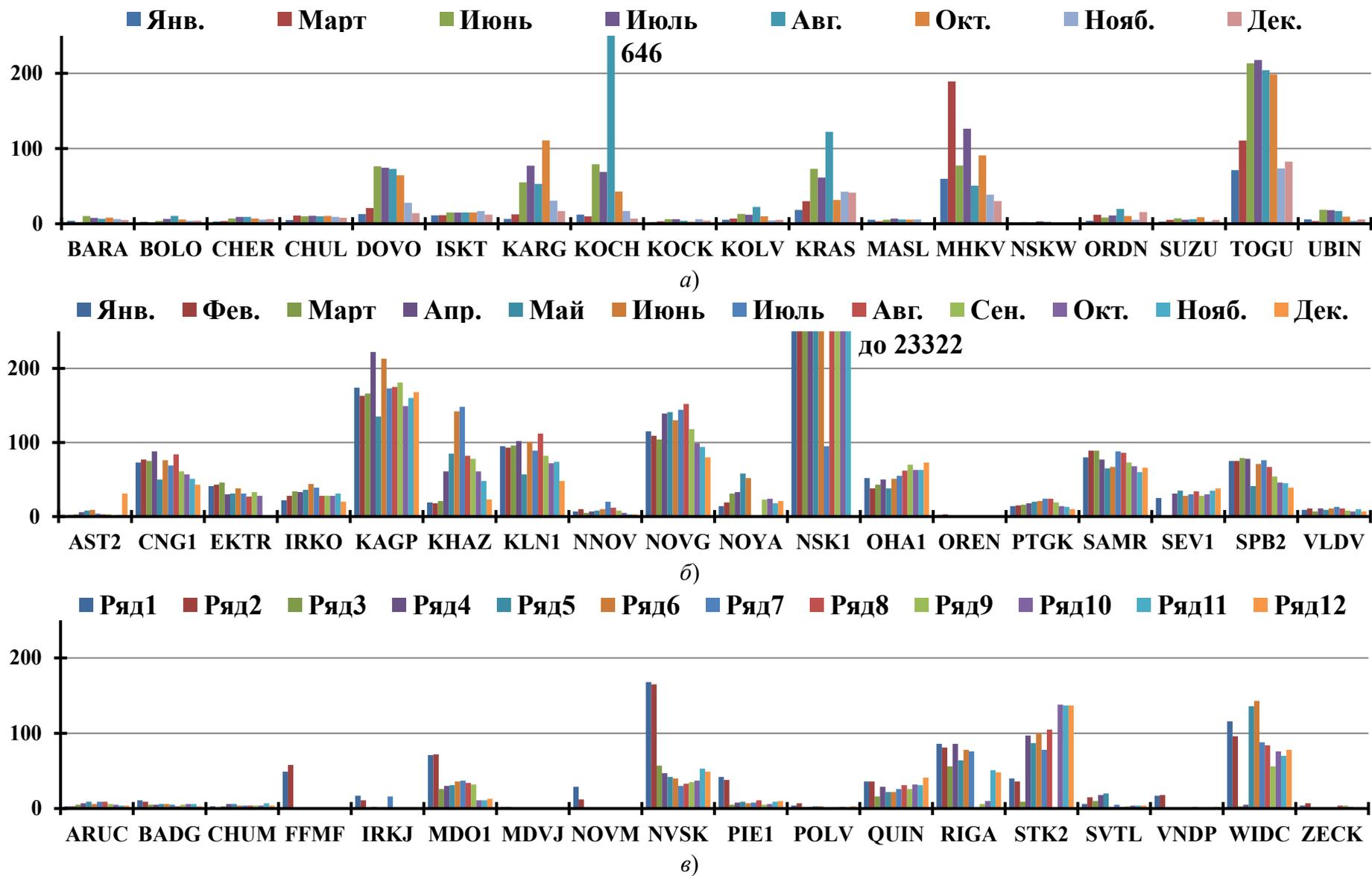


Рис. 4. Гистограммы количества срывов из-за влияния ионосферной задержки в течение года по каждому пункту:  
 а) по пунктам сети ДГС НСО; б) по пунктам ФАГС; в) по пунктам сети МГС

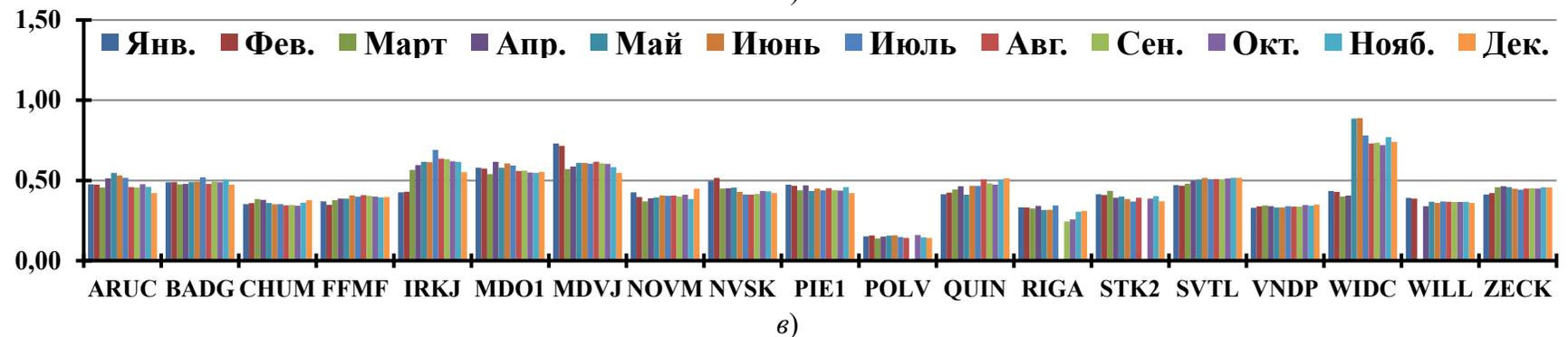
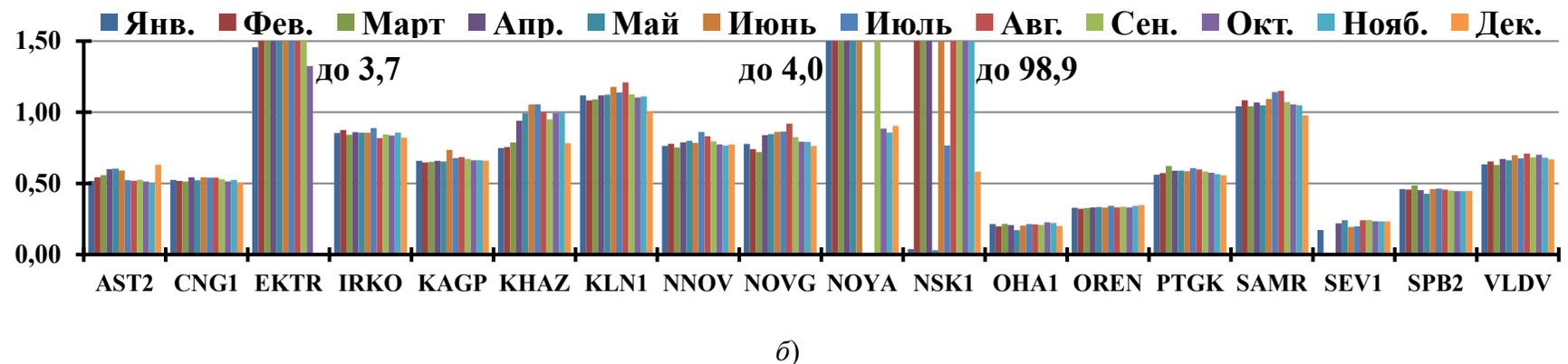
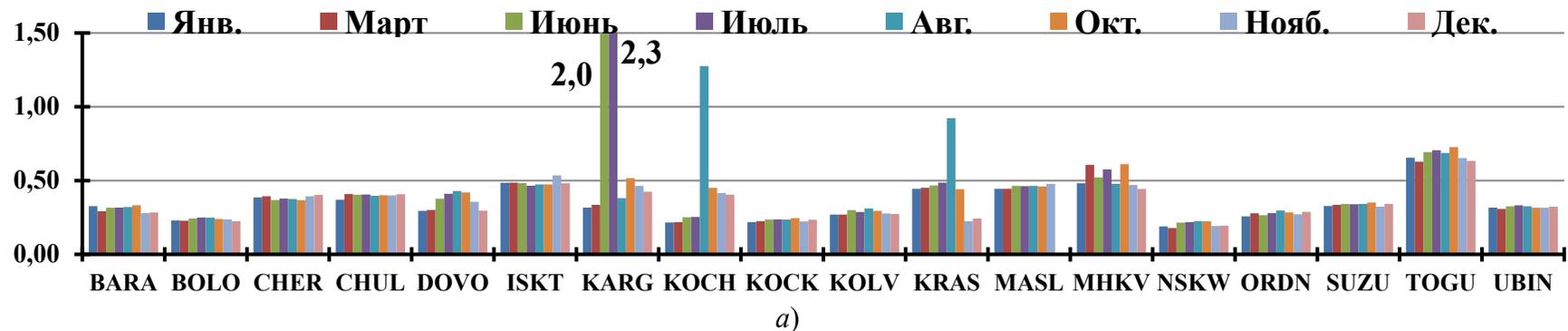


Рис. 5. Гистограммы осредненных комбинаций multiplicity для частоты L2 в течение года по каждому пункту:  
 а) по пунктам сети ДГС НСО; б) по пунктам ФАГС; в) по пунктам сети МГС

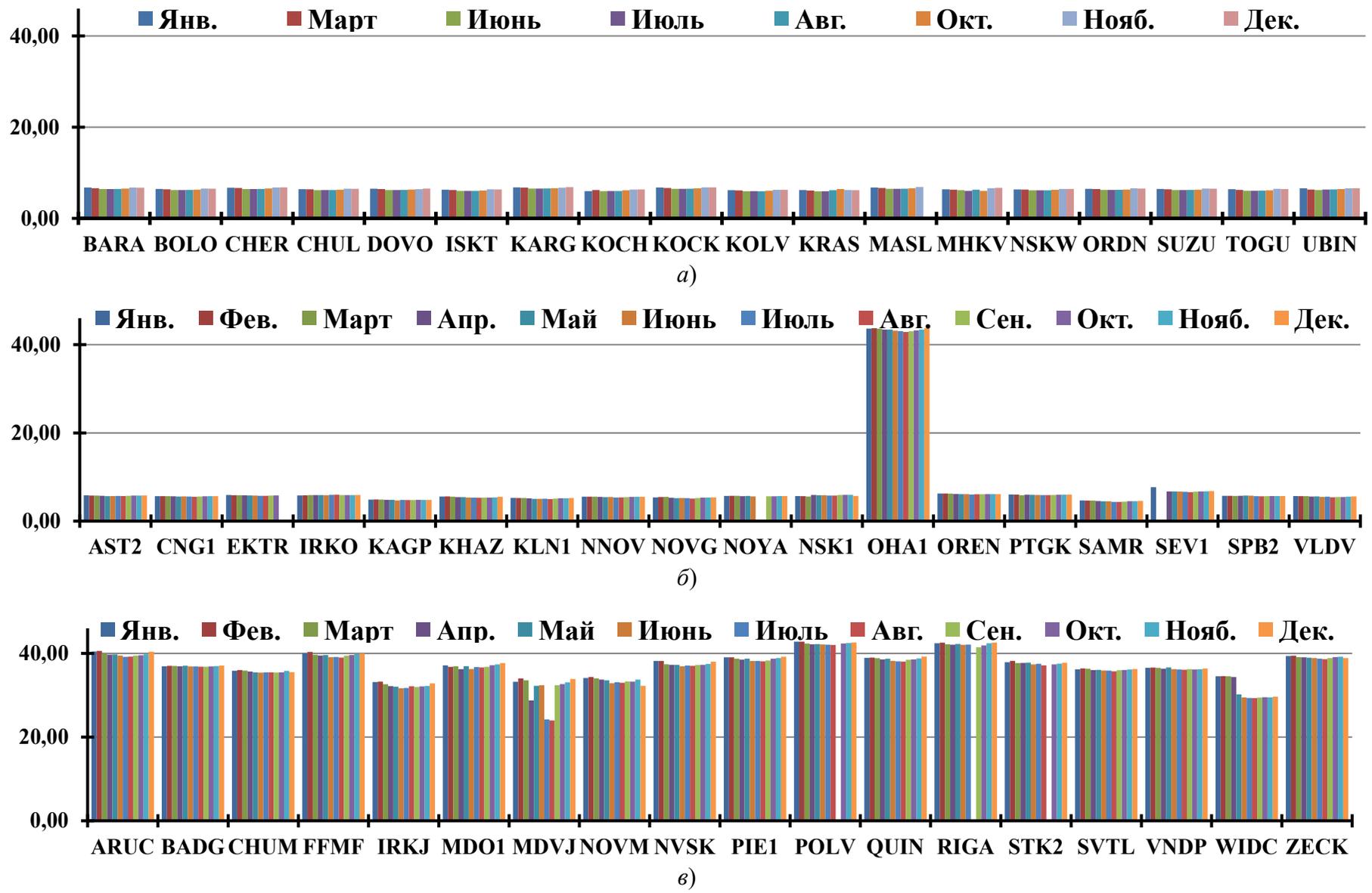


Рис. 6. Гистограммы среднего отношения «сигнал – шум» для частоты L2 в течение года по каждому пункту:  
 а) по пунктам сети ДГС НСО; б) по пунктам ФАГС; в) по пунктам сети МГС

Для отражения изменений влияния данных видов погрешностей в течение года по выбранным пунктам на гистограммах (см. рис. 3–6) приведены величины погрешностей, осредненные на месячном интервале.

Погрешность, вызванная влиянием эффекта многопутности, и отношение «сигнал – шум» в полном отчете об оценке качества определены для двух частот L1 и L2. В ходе исследования выявлено, что результаты оценки качества слабо зависят от частоты, на которой передается радиосигнал. Это подтверждают результаты, приведенные на рис. 2, в, г, поэтому на рис. 5, 6 для нормальной визуализации приведены результаты оценки качества только по частоте L2.

### Выводы

*Количество отбракованных измерений.* По осредненному на годовом интервале отношению полных измерений к общему числу возможных в пределах маски возвышения установлено, что ни на одном пункте сети МГС среднее количество отбракованных измерений не превышает 6 %. На пунктах сети ДГС НСО среднегодовое количество отбракованных измерений не превышает 7 %, за исключением пункта KARG. Как видно на гистограмме (см. рис. 5, а), в июне и июле 2018 г. на данном пункте выявлен значительный эффект многопутности. На четырех пунктах сети ФАГС среднее количество отбракованных измерений составляет более 14 %.

Высокий процент отбракованных измерений свидетельствует о том, что измерения, проводимые на пунктах, подвержены факторам, влияющим на снижение качества приема радиосигналов и точности результатов позиционирования. К таким факторам относятся погрешности, количественные оценки которых описаны далее.

*Ионосферная задержка.* При оценке качества спутниковых измерений установлено, что количество зафиксированных срывов циклов ниже маски возвышения 10 градусов превосходит количество срывов выше этой отметки в среднем по большинству пунктов в 5–6 раз.

Среднегодовое количество срывов циклов фазовых измерений вследствие задержки

прохождения радиосигнала через ионосферный слой атмосферы, вычисленных по обеим частотам выше маски возвышения, на пунктах сетей ДГС НСО и МГС меньше, чем на пунктах ФАГС более чем в 2 раза.

На гистограммах (см. рис. 4) видно, что количество срывов на каждом пункте любой сети с течением года относительно постоянно. В общем случае количество отбракованных измерений вследствие данного вида погрешности незначительно и не превышает 0,1 % от общего количества измерений. Для пунктов сети ДГС НСО это 0,05 %, для пунктов сети МГС – 0,07 %, для пунктов ФАГС – 0,1 %. Для пунктов ФАГС расчет проводился без учета пункта NSK1, на котором выявлено аномальное количество срывов (см. рис. 2, б и рис. 4, б). На этом пункте среднее количество срывов превосходит среднее количество срывов по всем остальным пунктам на 2–3 порядка и составляет около 25 % от среднесуточного количества принимаемых измерений. Такая аномальная величина наблюдалась в течение 10 месяцев, что, безусловно, ощутимо сказывается на точности результатов высокоточного позиционирования.

*Эффект многопутности.* Как видно на гистограммах (см. рис. 2, в и рис. 5), среднегодовая погрешность ГНСС-измерений вследствие эффекта переотражения сигнала на пунктах ФАГС превышает соответствующую погрешность на пунктах других сетей. На пунктах ФАГС, в сравнении с пунктами сети ДГС НСО, по комбинациям МР1 и МР2 в среднем она больше в 2 раза и составляет 0,76 и 0,85 м, тогда как на пунктах ДГС НСО в среднем она равна 0,37 и 0,39 м. На пунктах сети МГС среднегодовая погрешность многопутности по комбинациям МР1 и МР2 в среднем составляет 0,44 и 0,45 м.

В расчет средних значений не были включены результаты, полученные с пункта ФАГС NSK1. На этом пункте погрешность, вызванная эффектом многопутности, превышает среднюю погрешность по всем остальным пунктам почти в 100 раз. Выявленная аномальная погрешность может быть следствием того, что вблизи пункта NSK1 расположены предметы, поверхность которых имеет высокую степень рефлексивности,

или имеют место сбои в системе приемного оборудования. Поскольку на пункте NSK1 в течение 2018 г. также наблюдались аномальные погрешности, связанные с задержкой распространения сигнала в ионосфере, то точность позиционирования и точность сформированной базовой линии с использованием данного пункта может не удовлетворять ожидаемую. Выявленная аномальная погрешность многопутности в течение года оказывала влияние на пункт NSK1 на протяжении 8 месяцев. Если в настоящее время погрешности продолжают влиять на прием радиосигнала в той же степени, операторам пункта NSK1 необходимо обратить внимание на выявленный факт и устранить негативные причины, снижающие качество приема радиосигналов навигационных спутников.

Авторы работы [22] утверждают, что если процентная доля пунктов в сети со значениями средних комбинаций многопутности MP1 и MP2, не превышающих 0,5 м, составляет более 85 %, то такую сеть ДГС можно считать устойчивой к влиянию погрешности, вызванной эффектом многопутности. Сеть ДГС НСО (включая дополнительные 12 пунктов второй очереди) и сеть МГС этому критерию удовлетворяют, а ФАГС, исходя из анализа выбранных пунктов, нет.

*Отношение «сигнал – шум».* Как видно на гистограммах (см. рис. 2, 2 и рис. 6), отношение уровня полученного сигнала к уровню сопутствующего шума в приемном оборудовании сильно отличается на пунктах сети МГС в сравнении с пунктами ФАГС и ДГС НСО. Средний уровень SN1 и SN2 для пунктов этой сети составляет 44,5 и 37,6 Дб. На пунктах сети ДГС НСО и ФАГС в среднем это отношение в 5–6 раз меньше и составляет 7,7 и 6,6 Дб для ДГС НСО и 9,2 и 7,7 Дб для ФАГС. Только на пункте ФАГС ОНА1 отношение «сигнал-шум» сопоставимо с результатами пунктов сети МГС. В течение года по всем пунктам сетей ДГС НСО, ФАГС, МГС значение отношения «сигнал – шум» колебалось незначительно. Существенных выбросов значений на установленном временном интервале не обнаружено.

Отношение полезного сигнала к уровню сопутствующего шума зависит от приемного

оборудования и наличия вблизи пунктов источников постороннего радиоизлучения. Поскольку маловероятно, что на всех пунктах ДГС НСО и ФАГС, участвующих в исследовании, постороннее радиоизлучение влияет в приблизительно равной мере, то различия в полученных результатах можно объяснить различием в требованиях, определенных для оборудования, используемого для приема радиосигналов навигационных спутников. Приемное оборудование, устанавливаемое на пунктах МГС, должно удовлетворять современным требованиям, определенным в документе [15]. Такие требования позволяют гарантировать высокое качество приема радиосигналов и обеспечить поддержание сети МГС в качестве передовой глобальной спутниковой сети.

*Смещение шкалы времени часов приемника относительно часов спутника.* В ходе оценки качества с помощью утилиты Teqc смещение шкал времени часов (clock offsets), а также общий дрейф часов (clock drift) ни по одному пункту любой сети не показали значения, отличные от нуля. Данному виду погрешности в большей степени подвержены спутниковые приемники, имеющие менее точные кварцевые стандарты частоты, чем приемники, устанавливаемые на постоянно действующих ДГС. Также данная погрешность будет определена в случае малого количества видимых спутников, когда приемник не сможет синхронизировать часы со всеми КА.

Анализируя гистограммы на рис. 3–6, можно заметить интересный факт. По всем пунктам сетей ДГС НСО, ФАГС, МГС очевидно закономерное изменение погрешности, вызванной задержкой сигнала в ионосфере, и погрешности многопутности в зависимости от времени года. В общем случае погрешности возрастают к середине года и к концу года уменьшаются. Аналогично с критерием отношение «сигнал – шум». На гистограммах по большинству пунктов можно заметить уменьшение отношения «сигнал – шум» летом и увеличение зимой. Колебание значений критериев оценки качества происходит на уровне 5–10 %. Вероятно, данный факт связан с изменением солнечной активности (все пункты, участвующие в исследовании, расположены в северном полушарии).

### Заключение

При анализе спутниковых измерений, полученных с пунктов региональной сети ДГС НСО, ни на одном пункте на годовом интервале не выявлено существенных погрешностей при принятии радиосигналов навигационных спутников. Основные погрешности спутниковых измерений приблизительно в равной мере влияют на все пункты сети ДГС НСО. Качество ГНСС-измерений, полученных с этих пунктов, в среднем по каждому из вышеприведенных критериев превосходит качество измерений, полученных с пунктов ФАГС, и соответствует качеству измерений, полученных с пунктов МГС. За исключением показателя отношение «сигнал – шум», по которому качество измерений пунктов сети МГС превосходит качество измерений пунктов сетей ДГС НСО и ФАГС в среднем в 5–6 раз. По приведенным результатам можно сделать выводы о том, что с точки

зрения качества проводимых ГНСС-измерений пункты сети ДГС НСО не уступают пунктам ФАГС. Поэтому исходя из тех критериев, по которым была проведена оценка качества, включение сети ДГС НСО в первый уровень ОГС может быть обоснованным.

Вышеперечисленные критерии оценки качества принимаемых радиосигналов можно использовать для анализа ГНСС-измерений, полученных с любых ДГС или сетей ДГС, например [1–4], чтобы судить о возможности включения их в тот или иной уровень ОГС. Анализ качества с помощью программной утилиты Teqc позволяет оценить численные характеристики основных погрешностей, сопровождающих процесс высокоточного спутникового позиционирования. Это дает возможность определить слабые места в системе приема радиосигналов пунктами сетей ДГС, что важно для эффективного развития геодезической координатной основы и системы КВНО Российской Федерации.

### БИБЛИОГРАФИЧЕСКИЙ СПИСОК

1. НП ОСВСП Некоммерческое партнерство операторов сетей высокоточного спутникового позиционирования [Электронный ресурс]. – Режим доступа: <http://nposvsp.ru/>.
2. Сервис предоставления RTK поправок, получаемых сетью постоянно действующих базовых станций SmartNet [Электронный ресурс]. – Режим доступа: <http://smartnet-ru.com/>.
3. Система спутниковых измерений сетью постоянно действующих базовых станций NIVE [Электронный ресурс]. – Режим доступа: <https://hive.geosystems.aero/>.
4. Инфраструктурный проект группы компаний EFT GROUP. Сеть референчных ГНСС-станций EFT-CORS [Электронный ресурс]. – Режим доступа: <http://eftgroup.ru/>.
5. Карпик А. П., Липатников Л. А., Лагутина Е. К. О направлении развития опорной геодезической сети России как элемента единой системы координатно-временного и навигационного обеспечения // Гироскопия и навигация. – 2016. – Т. 24, № 2 (93). – С. 87–94.
6. Проблемы и перспективы развития активных спутниковых геодезических сетей в России и их интеграции в ITRF / В. С. Вдовин, В. В. Дворкин, А. П. Карпик, Л. А. Липатников, С. Д. Сорокин, Г. М. Стеблов // Вестник СГУГиТ. – 2018. – Т. 23, № 1. – С. 6–27.
7. Демьянов Г. В., Майоров А. Н., Побединский Г. Г. Проблемы непрерывного совершенствования ГГС и геоцентрической системы координат России // Геопрофи. – 2011. – № 4.
8. Герасимов А. П. Проблемы спутниковых дифференциальных геодезических станций // Геопрофи. – 2012. – № 3. – С. 52–53.
9. Анализ состояния государственной геодезической сети России с учетом существующих и перспективных требований / Е. М. Мазурова, К. М. Антонович, Е. К. Лагутина, Л. А. Липатников // Вестник СГГА. – 2014. – Вып. 3 (27). – С. 84–89.
10. Федеральное государственное бюджетное учреждение «Центр геодезии, картографии и инфраструктуры пространственных данных» [Электронный ресурс]. – Режим доступа: <https://cgkipd.ru>.
11. Сурнин Ю. В. О корректном применении международной терминологии «Reference System» и «Reference Frame» к понятиям «система координат» и «координатная основа» в геодезической практике России // Геодезия и картография. – 2015. – № 8. – С. 3–9.
12. Терещенко В. Е., Лагутина Е. К. Сравнение относительных смещений пунктов сети постоянно действующих базовых станций Новосибирской области, полученных с использованием различных онлайн-сервисов обработки спутниковых измерений // Вестник СГУГиТ. – 2019. – Т. 24, № 2. – С. 76–94.
13. Лагутина Е. К. Апробация методики включения сети постоянно действующих базовых станций

вых станций Новосибирской области в государственную геодезическую сеть // Вестник СГУГиТ. – 2016. – № 3(35). – С. 35–42.

14. Липатников Л. А. Эксперимент по формированию геоцентрической земной координатной основы на территории РФ и ближнего зарубежья // Вестник СГУГиТ. – 2016. – № 3(35). – С. 16–26.

15. Site Guidelines – IGS [Электронный ресурс]. – Режим доступа: <https://kb.igs.org/hc/en-us/articles/202011433>.

16. Teqc Tutorial: Basics of Teqc Use and Teqc Products – 2014 [Электронный ресурс]. – Режим доступа: <https://www.unavco.org/software/data-processing/teqc/teqc.html>.

17. Государственное бюджетное учреждение «Центр навигационных и геоинформационных технологий Новосибирской области» [Электронный ресурс]. – Режим доступа: <http://rtk.nso.ru/spiderweb/firmIndex.aspx>.

18. SOPAC – Scripps Orbit and Permanent Array Center [Электронный ресурс]. – Режим доступа: <http://sopac.ucsd.edu/dataBrowser.shtml>.

19. Minchan Kim, Jiwon Seo, Jiyeon Lee. A comprehensive method for GNSS data quality determination to improve ionospheric data analysis // Sensors 2014 (14), 14971-14993; 23 pages. doi:10.3390/s140814971.

20. Косарев Н. С. Исследование методики контроля фазовых ГНСС-измерений по имитационным данным GPS // Вестник СГУГиТ. – 2016. – Вып. 1 (33). – С. 6–13.

21. Danijel Šugar, Petar Sučić, Željko Bačić Examination of Site Suitability for GNSS // Proc of SIG: International Symposium on Engineering Geodesy, (2016). – P. 255–266. Varaždin, Croatia.

22. Yaxuan Hu, Lin Cheng, Xiong Wang Quality analysis of the campaign GPS stations observation in Northeast and North China // Geodesy and Geodynamics 2016. – Vol. 7 (12), March 2016. – pp. 87–94.

Получено 10.06.2020

© В. Е. Терещенко, 2020

## QUALITY ANALYSIS OF GNSS OBSERVATIONS OF REFERENCE STATIONS NETWORK WITH THE TEQC UTILITY

*Vyacheslav E. Tereshchenko*

Siberian State University of Geosystems and Technologies, 10, Plakhotnogo St., Novosibirsk, 630108, Russia, Ph. D. Student, phone: (953)766-70-14, e-mail: [taboretzvigyn@mail.ru](mailto:taboretzvigyn@mail.ru)

The measurements of Global Navigation Satellite System (GNSS) obtained from different reference stations: Novosibirsk Region reference stations network, Russian state reference stations network – Fundamental Astronomical and Geodetic Networks (FAGN) and stations of International GNSS service (IGS) are checked and analyzed. The relevance of the usage of regional (commercial or industrial) reference stations in state foundation geodetic framework for formation of a unified system of coordinate-time and navigation support is shown. The article describes quality analysis results of the GNSS measurements by the main criteria: number of rejected measurements, ionospheric delay, multipath effect, signal-to-noise ratio, receiver clock slips. The main errors affecting satellite measurements are estimated. The conclusions about the possibility of including the Novosibirsk Region reference stations network into one of the levels of the state foundation geodetic framework are drawn. The comparison of quality of the GNSS measurements showed that according to all criteria of quality the GNSS measurements of the Novosibirsk Region reference stations network are not worse than GNSS measurements of FAGN. According to all criteria the GNSS measurements of the Novosibirsk Region reference stations network approximately corresponds to GNSS measurements of IGS stations, except the signal-to-noise ratio criterion.

**Key words:** Global Navigation Satellite Systems, GNSS observations, quality checking of GNSS observations, reference station, reference stations network, Teqc utility.

## REFERENCES

1. *Nekommercheskoe partnerstvo operatorov setey vysokotochnogo sputnikovogo pozitsionirovaniya [Nonprofit partnership of high precision satellite positioning networks]*. (n. d.). Retrieved from <http://nposvsp.ru/index.php?id=6> [in Russian].

2. *Servis predostavleniya RTK popravok poluchaemykh set'yu postoyanno deystvuyushchikh bazovykh stantsiy SmartNet [The service provision of RTK corrections received by the network of permanent stations]*.

nently operating base stations SmartNet]. (n. d.). Retrieved from <http://smartnet-ru.com/> [in Russian].

3. *Sistema sputnikovykh izmereniy set'yu postoyanno deystvuyushchikh bazovykh stantsiy HIVE [The system of satellite measurements getting by the permanently operating base stations HIVE]*. (n. d.). Retrieved from <https://hive.geosystems.aero/> [in Russian].

4. *Infrastrukturnyy proekt gruppy kompaniy EFT GROUP. Set' referentsnykh GNSS-stantsiy EFT-CORS [Infrastructure project of EFT GROUP. The network of reference GNSS-stations EFT-COURSE]*. (n. d.). Retrieved from <http://eftgroup.ru/> [in Russian].

5. Karpik, A. P., Lipatnikov, L. A., & Lagutina, E. K. (2016). Prospective development of the Russian geodetic reference network as a component part of the unified system for positioning, navigation, and timing. *Giroskopiya i navigaciya [Gyroscopy and Navigation]*, 24, 2(93), 264–268 doi: 10.1134/S207510871603007X [in Russian].

6. Vdovin, V. S., Dvorkin, V. V., Karpik, A. P., Lipatnikov, L. A., Sorokin, S. D., & Steblov, G. M. (2018). Current state and future development of active satellite geodetic networks in Russia and their integration into ITRF. *Vestnik SGUGiT [Vestnik SSUGT]*, 23(1), 6–27 [in Russian].

7. Demyanov, G. V., Mayorov, A. N., & Pobedin-skiy, G. G. (2011). Problems of continuous improvement of the state geodetic network and Russian geocentric coordinate system. *Geoprofi [Geoprofi]*, 4, 15–21 [in Russian].

8. Gerasimov, A. P. (2012). Problems of differential geodetic reference stations. *Geoprofi [Geoprofi]*, 3, 52–53 [in Russian].

9. Mazurova, E. M., Antonovich, K. M., Lagutina, E. K., & Lipatnikov, L. A. (2014) Analysis of the Russian national reference network condition considering modern and prospective requirements. *Vestnik SGUGiT [Vestnik SSUGT]*, 3(27), 84–89 [in Russian].

10. *Federal'noe gosudarstvennoe byudzhethoe uchrezhdenie "Centr geodezii, kartografii i infrastruktury prostranstvennykh dannykh" [Federal State Budget Institution "Center for Geodesy, Cartography and Spatial Data Infrastructure"]*. (n. d.). Retrieved from <https://cgkipd.ru/> [in Russian].

11. Sumin, Yu. V. (2015). About correct application of international terminology "Reference System" and "Reference Frame" to "koordinatnaya sistema" and "koordinatnaya osnova" in practice of geodesy in Rus-

sia. *Geodeziya i kartografiya [Geodesy and Cartography]*, 8, 3–9 [in Russian].

12. Tereshchenko, V. E., Lagutina, E. K. (2019). Determining of Novosibirsk Region reference stations offsets by comparison method of free online GNSS post-processing services. *Vestnik SGUGiT [Vestnik SSUGT]*, 24(2), 76–94 [in Russian].

13. Lagutina, E. K. (2016). Testing methods of integration regional cors network and the russianstate geodetic network. *Vestnik SGUGiT [Vestnik SSUGT]*, 3(35), 35–40 [in Russian].

14. Lipatnikov, L. A. (2016). Implementation of a geocentric terrestrial reference frame for the territory of Russia and bordering countries. *Vestnik SGUGiT [Vestnik SSUGT]*, 3(35), 16–24 [in Russian].

15. *Site Guidelines – IGS*. (n. d.). Retrieved from <https://kb.igs.org/hc/en-us/articles/202011433>

16. Teqc Tutorial: Basics of Teqc Use and Teqc Products (2014). (n. d.). Retrieved from <https://www.unavco.org/software/data-processing/teqc/teqc.html>.

17. *Gosudarstvennoe byudzhethoe uchrezhdenie "Tsentr navigatsionnykh i geoinformatsionnykh tekhnologiy Novosibirskoy oblasti" [State Budgetary Institution "Center for Navigation and Geoinformation Technologies of the Novosibirsk Region"]*. (n. d.). Retrieved from <http://rtk.nso.ru/spiderweb/firmIndex.aspx> [in Russian].

18. *SOPAC – Scripps Orbit and Permanent Array Center*. (n. d.). Retrieved from <http://sopac.ucsd.edu/dataBrowser.shtml>.

19. Minchan Kim, Jiwon Seo, Jiyun Lee (2014). A comprehensive method for GNSS data quality determination to improve ionospheric data analysis. *Published 2014 in Sensors*, 14971-14993. doi: 10.3390/s140814971.

20. Kosarev, N. S. (2016). Research method of control phase GNSS measurements based on simulation data. *Vestnik SGUGiT [Vestnik SSUGT]*, 33(1), 6–13 [in Russian].

21. Danijel Šugar, Petar Sučić, Željko Bačić (2016). Examination of Site Suitability for GNSS. *Proc of SIG: International Symposium on Engineering Geodesy*, ISBN 978-953-59018-0-8 pp. 255–266. Varaždin, Croatia.

Yaxuan Hu, Lin Cheng, Xiong Wang Quality analysis of the campaign GPS stations observation in Northeast and North China (2016). *Geodesy and Geodynamics*. – Vol. 7 (12), pp. 87–94. doi: 10.1016/j.geog.2016.03.008.

Received 10.06.2020

© V. E. Tereshchenko, 2020