

ЭКСПЕРИМЕНТАЛЬНАЯ ОЦЕНКА АППАРАТУРНОЙ ТОЧНОСТИ КОМПЛЕКТА СПУТНИКОВЫХ ГЕОДЕЗИЧЕСКИХ ПРИЕМНИКОВ

Г.А. Шануров (1949–2017)

В 1971 г. окончил геодезический факультет МИИГАиК по специальности «астрономогеодезия». После окончания института работал в отделе инженерных изысканий 20-го ЦПИ МО. С 1975 г. по 2017 г. работал на кафедре высшей геодезии в МИИГАиК. Был профессором Мадридского политехнического университета и членом Международной ассоциации геодезии (IAG). Профессор, доктор технических наук. Почетный геодезист.

В.Ю. Афанасьев («Мостоотряд-55»)

В 2017 г. окончил магистратуру геодезического факультета МИИГАиК с присвоением квалификации «магистр» по направлению «геодезия и дистанционное зондирование». В 2013 г. работал в ООО «Геотрест» (Мытищи), с 2014 г. — в Институте физики Земли им. О.Ю. Шмидта РАН, с 2015 г. — в ООО «Топкон Позиционинг Системс». С 2017 г. работает в ООО «Мостоотряд-55», в настоящее время — инженер-геодезист.

Международная ассоциация геодезии (International Association of Geodesy — IAG) прилагает усилия к повышению точности глобальной геодезической сети и региональных геодезических сетей. 10 февраля 2016 г. в МИИГАиК состоялся научный семинар, на котором с докладом выступил президент IAG Харальд Шу (Harald Schuh). Он сообщил, что в перспективе точность координат пунктов геодезических сетей будет характеризоваться ошибкой, не превышающей одного миллиметра. Глобальную геодезическую сеть создают, используя сочетание двух методов: радиоинтерферометрии со сверхдлинной базой и лазерной локации искусственных спутников Земли [1]. Именно эти методы задают и фиксируют общеземную систему координат, а также Международную земную референцную опору (International Terrestrial Reference Frame — ITRF) [2].

Однако основной объем измерений в опорных геодезических сетях выполняют с использованием приемников систем глобального спутникового позиционирования GPS (Navstar) и ГЛОНАСС. Результаты измерений сопровождаются ошибками, вызванными многочисленными источниками [3]. Необходимым (но недостаточным) условием достижения заявленной Харальдом Шу точности является требование по обеспечению высокой инструментальной точности геодезической спутниковой аппаратуры (включая используемое программное обеспечение). Таким образом, имеется необходимость оценить аппаратную точность (инструментальную точность, внутреннюю точность, разрешающую способность) геодезического спутникового оборудования в комплексе с программным (алгоритмическим) обеспечением. Такую оценку точности можно сделать на ос-

нове эксперимента. Авторы сконструировали и создали экспериментальную установку, разработали методику проведения исследований, выполнили их и оценили полученные результаты.

Спутниковые технологии позволяют определять разности плановых координат двух пунктов со средней квадратической ошибкой (СКО) 2 мм и разности геодезических высот этих пунктов с СКО 3 мм. Такие результаты были получены авторами при создании локальной опорной геодезической сети. Длины сторон в этой сети составляли примерно 0,5 км. Длительность сессии наблюдений была равна 1,5 часа, длительность цикла наблюдений — 15 секунд. Но и при столь коротких длинах сторон на пунктах сети имели место разные условия для приема и регистрации сигналов, входящих со спутников навигационных систем на антенны при-

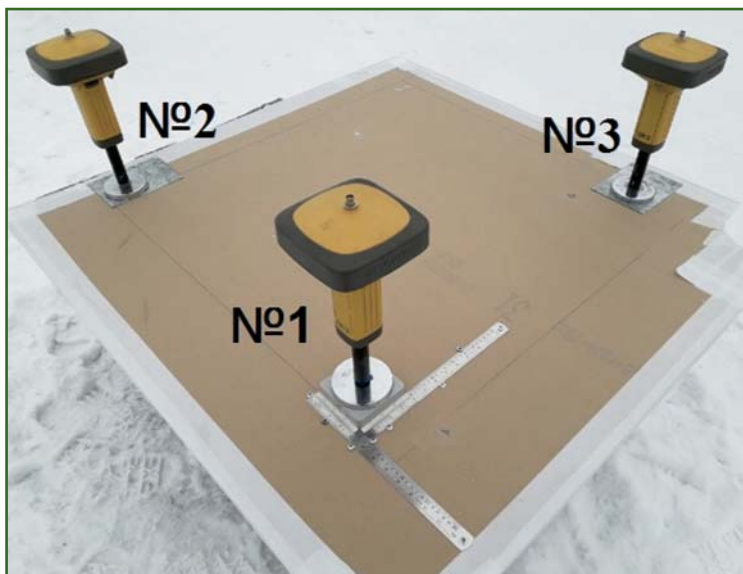


Рис. 1
Экспериментальная установка

емников. Например, многопутность (multipath) сигналов от спутников могла повлиять на точность результатов измерений. Для того, чтобы оценить именно аппаратную точность геодезического спутникового оборудования и исключить, или, по возможности, ослабить влияние на результаты измерений иных источников ошибок, авторы сочли необходимым и целесообразным поместить приемники в одинаковые условия приема сигналов от созвездия навигационных спутников. При выполнении эксперимента приемники расположили на расстояниях друг от друга (длинах базовых линий), не превышающих 1,5 м. При столь малых расстояниях, по мнению авторов, ошибки определения векторов между приемниками будут зависеть исключительно от аппаратных ошибок. Во всяком случае, влияние внешней среды (атмосфера, многопутность сигналов) одинаковы для каждой пары приемников.

В работе [4] описан эксперимент, выполненный в 2005 г., целью которого являлась оценка возможностей комплекта из двух геодезических спутнико-

вых приемников по определению малых смещений при разной длительности интервалов накопления результатов измерений. Использовался специальный измерительный столик, который позволял перемещать в плане и по высоте антенну исследуемого приемника, а антенна другого приемника, выполнявшего роль референцной (опорной) станции, устанавливалась неподвижно на удалении от него. Наибольшая длительность интервалов накопления результатов измерений составила 10 минут. СКО определения планового положения перемещаемого приемника по каждой координате получилась равной примерно 1,7 мм, а СКО по высоте — 4,5 мм.

Установка, использованная в эксперименте, проводимом авторами, содержала три спутниковых геодезических приемника Торсон GR-3, расположенных рядом друг с другом. Один из них был установлен с возможностью перемещения, а два других являлись референчными. Приемники были размещены на одной платформе в виде квадрата с длиной сторон 1,2 м (рис. 1).

Референчные приемники № 2 и № 3 были жестко закреплены на платформе. Горизонтальность платформы контролировалась с помощью переносного круглого уровня. Подвижный приемник № 1 имел магнитное основание, что позволило фиксировать его положение на платформе с помощью массивного металлического бруска размером 100x100x20 мм, размещенного под платформой. Длины базовых линий между приемниками № 1 и № 2, № 1 и № 3 составили 80 см, а между приемниками № 2 и № 3 — 113 см. В качестве отсчетных устройств использовались две металлические линейки с ценой деления шкал 0,5 мм и два верньера. Линейки были жестко закреплены на платформе перпендикулярно друг другу, а верньеры — на основании перемещаемого приемника № 1, также перпендикулярно друг другу. От использования специального измерительного столика решили отказаться во избежание возможных систематических ошибок, присущих микрометрам. Брусок позволял перемещать вдоль обеих линеек приемник № 1. Величину перемещения отсчитывали с предельной ошибкой 0,1 мм по шкале линейки с помощью верньера. Экспериментальную установку разместили на крыше одного из зданий в Москве (рис. 2). Во время выполнения наблюдений стояла облачная погода без осадков, температура воздуха составляла -1°C .

Приемник № 1 смещали с интервалом в 1 мм вдоль перпендикулярных друг другу базовых линий между приемниками № 1 и № 2 по направлению, ориентированному на запад-восток, и между приемниками № 1 и № 3 — на юг-север. Таким образом, расстояние между подвижным приемником и рефе-



Рис. 2
Экспериментальная установка на фоне окружающего пейзажа

ренчным приемником сокращалось. Установка приемника № 1 выполнялась с многократным визуальным контролем, в том числе, с использованием лупы четырехкратного увеличения.

Длительность сессии спутниковых наблюдений составила 30 минут при каждой установке приемника. Это в 3 раза больше, чем в эксперименте, описанном в [4]. Управление приемниками выполнялось с помощью полевого контроллера Topcon FC-500 по беспроводной связи через Bluetooth. При измерениях использовались следующие настройки приемников: маска по углу возвышения спутников над горизонтом — 10°, прием сигналов GPS и ГЛОНАСС — на частоте L1, режим измерений — «статика», длительность цикла измерений — 1 секунда.

В результате эксперимента для каждого приемника было получено 12 файлов спутниковых измерений в формате TPS, соответствующих следующей последовательности сдвигов приемника № 1, включая начальное положение, в котором отсчет по линейкам был равен нулю:

— сдвиг в сторону приемника № 2 на 1 мм, 2 мм, 3 мм, 4 мм и 5 мм;

— сдвиг в сторону приемника № 3 на 1 мм, 2 мм, 3 мм, 4 мм и 5 мм.

Результаты измерений были импортированы в программу MAGNET Office Tools. После обработки получили координаты положений приемника № 1 в локальной системе координат **N, E, Ht** с началом в фазовом центре референсного приемника, относительно которого определялся сдвиг приемника № 1. Ось **N** направлена на северное пересечение меридианов эллипсоида WGS-84. Ось **E** перпендикулярна оси **N** и направлена на восток. Ось **Ht** направлена в зенит по нормали к эллипсоиду WGS-84.

Точно ориентировать экспериментальную установку так, чтобы сдвиг приемника № 1 выполнялся строго на север или на другую сторону света, невозможно, потому что, как было сказано выше, координаты перемещаемого приемника вычислялись относительно референсных приемников в локальной системе координат, связанной с эллипсоидом

WGS-84. Поэтому вычислять сдвиг по одной из двух координат ΔN и ΔE , считая, что в ходе выполнения эксперимента изменялась только одна координата, а другая была постоянной, некорректно. Следовательно, для вычисления сдвига приемника № 1 необходимо было разработать другую методику обработки результатов спутниковых измерений.

В программе Microsoft Office Excel была выполнена обработка координат положений приемника № 1 и длин базовых линий. Величины сдвига приемника № 1 по результатам обработки спутниковых измерений вычислялись по формуле:

$$d_i = \sqrt{(\Delta N_i - \Delta N_0)^2 + (\Delta E_i - \Delta E_0)^2}, \quad (1)$$

где $i = 0, 1, \dots, 5$;

ΔN_0 и ΔE_0 — координаты приемника № 1 при начальном положении (сдвиг равен нулю);

ΔN_i и ΔE_i — координаты приемника № 1 после смещения.

Параметр d_i показывает величину сдвига приемника № 1 по результатам обработки спутниковых измерений, но не характеризует направление сдвига, т. е. по нему невозможно определить, сместился приемник № 1 строго по направлению к референсному приемнику или же в другом неизвестном направлении.

Следовательно, для достоверного определения сдвига необходимо провести дополнительные вычисления и ввести новый параметр, характеризующий направление сдвига. Этот параметр был назван также вычисленным сдвигом приемника № 1 по результатам обработки спутниковых измерений, но обозначен b_i .

Параметр, характеризующий отклонение от реального на-

правления сдвига приемника № 1 к референцному приемнику, был вычислен по формуле:

$$b_i = S_0 - S_i, \quad (2)$$

где $i = 0, 1, \dots, 5$;

S_0 — длина базовой линии при начальном положении приемника № 1 (сдвиг равен нулю);

S_i — длина базовой линии после смещения приемника № 1.

Сдвиг приемника № 1 выполнялся к референцному приемнику, следовательно, длина базовой линии до сдвига должна быть больше длины базовой линии после сдвига на величину сдвига, поэтому в формуле (2) уменьшаемым является длина базовой линии до определяемого сдвига, а вычитаемым — длина базовой линии после определяемого сдвига.

Таким образом, параметр b_i может принимать положительные и отрицательные значения, а параметр d_i — только положительные значения. При этом d_i больше или равно b_i .

Предположим, что

$$d_i = b_i = c_i, \quad (3)$$

где c_i — измеренное по линейке расстояние 0, 1, ..., 5 мм.

Тогда из предположения (3) следует, что по результатам обработки спутниковых измерений перемещаемый приемник сместился на величину c_i , т. е. на истинное значение сдвига, строго по направлению к референцному приемнику. Это означает, что спутниковое оборудование совершенно точно определило величину и направления сдвига.

В реальности, вычисленные параметры d_i и b_i не всегда равны друг другу и отклоняются каждый на некоторую величину от истинного значения c_i . Поэтому, чтобы оценить аппаратную точность комплекта спутниковых геодезических приемников в комплексе с программным обеспечением, необходимо ввести параметр, по которому будет выполняться оценка точности определения величины и направления сдвига.

Этот параметр характеризует отклонение вычисленного сдвига от истинного значения. Так как вычисленных сдвигов два — d_i и b_i , то и этих параметров тоже два — D_i и B_i , и вычисляются они по формулам:

$$D_i = d_i - c_i; \quad (4)$$

$$B_i = b_i - c_i. \quad (5)$$

Таким образом, оценка аппаратной точности выполнялась по следующим условиям:

1. $d_i - b_i = 0$;
2. $D_i = d_i - c_i = 0$;
3. $B_i = b_i - c_i = 0$.

Если все три условия выполнялись с отклонением от нуля в пределах $\pm 0,5$ мм, то вычисленное положение приемника № 1 после сдвига считалось близким к истинному положению приемника после сдвига на экспериментальной установке.

На рис. 3 изображен график изменения значений параметра D_i , который характеризует отклонение величины сдвига, вычисленного по результатам обработки спутниковых измерений, от его истинного значения, измеренного по линейке. Кривая 1 красного цвета показывает величину сдвига при смещении приемника № 1 к приемнику № 2, а кривая 2 синего цвета — при смещении приемника № 1 к приемнику № 3.

На рис. 4 изображен график изменения значений параметра B_i , который характеризует отклонение вычисленного параметра, определяющего направление сдвига, от его истинного значения, измеренного по линейке. Кривая 1 красного цвета показывает направление сдвига при смещении приемника № 1 к приемнику № 2, а кривая 2 синего цвета — при смещении приемника № 1 к приемнику № 3.

На рис. 5 изображен график разностей $(d_i - b_i)$ между значениями параметра, характеризующего величину сдвига (d_i),

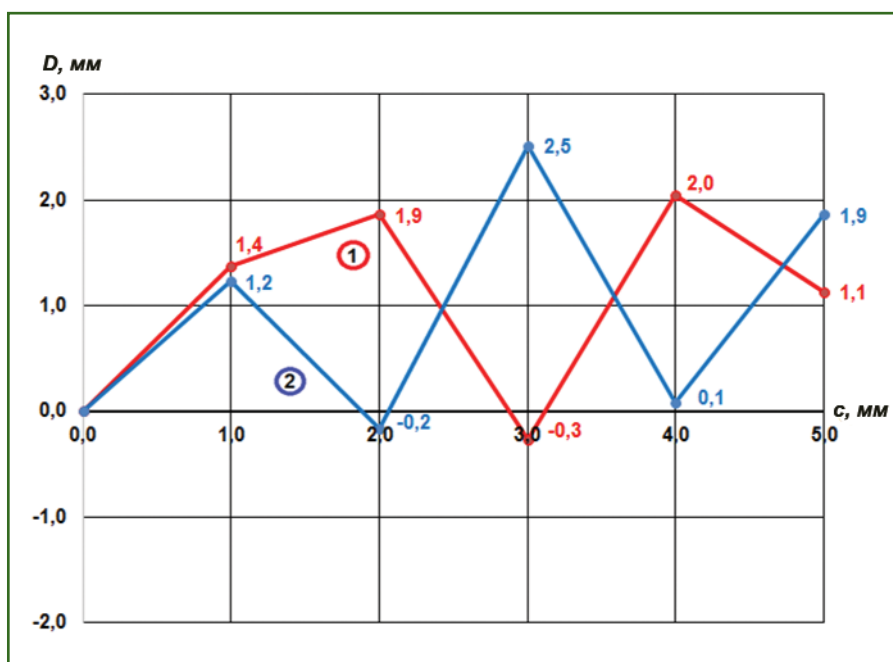


Рис. 3

График изменения значений параметра, характеризующего отклонение величины сдвига приемника № 1 относительно референцных приемников

и параметра, характеризующего направление сдвига (b_i), при смещении приемника № 1 к приемнику № 2 (кривая 1 красного цвета) и при смещении приемника № 1 к приемнику № 3 (кривая 2 синего цвета).

В программе Microsoft Office Excel была выполнена оценка точности определения смещений приемника № 1. По формуле Гаусса были вычислены СКО отклонений сдвига, вычисленного из результатов обработки спутниковых измерений, от истинного значения, измеренного по линейке, при смещении приемника № 1 к приемнику № 2 и при смещении приемника № 1 к приемнику № 3.

СКО определения отклонений значений параметра, характеризующего величину сдвига, вычисленного из результатов обработки спутниковых измерений, от истинного значения при смещении приемника № 1 к приемнику № 2 составила 1,5 мм. СКО определения отклонений значений параметра, характеризующего величину сдвига, вычисленного из результатов обработки спутниковых измерений, от истинного значения при смещении приемника № 1 к приемнику № 3 — 1,5 мм.

Аналогичная методика была применена для оценки точности определения высоты приемника №1. СКО определения высоты на линии приемник № 1 — приемник № 2 равна 2,8 мм. СКО определения высоты на линии приемник № 1 — приемник № 3 — 2,0 мм. Полная СКО по линии приемник № 1 — приемник № 2 составила 3,2 мм. Полная СКО по линии приемник № 1 — приемник № 3 — 2,5 мм.

СКО определения отклонений значений параметра, характеризующего направление сдвига, вычисленного из результатов обработки спутнико-

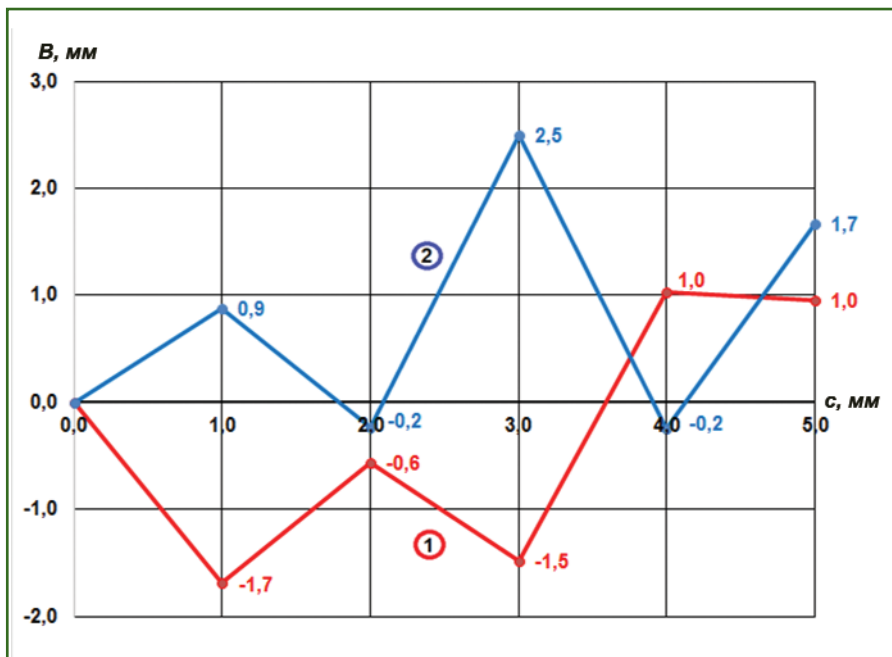


Рис. 4
График изменения значений параметра, который характеризует отклонение вычисленного параметра, определяющего направление сдвига приемника № 1 относительно референчных приемников

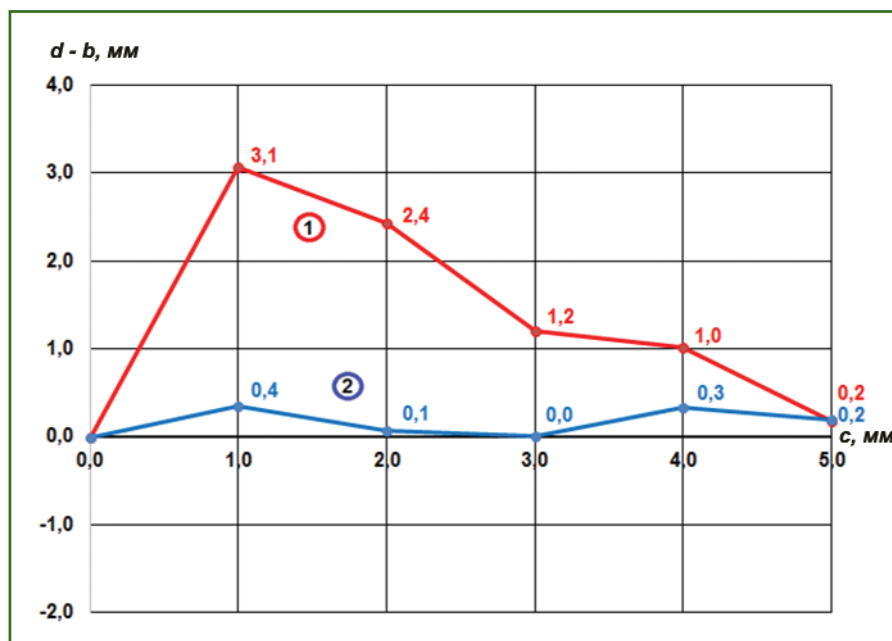


Рис. 5
График разностей между значениями d_i и b_i при смещении приемника № 1 относительно референчных приемников

вых измерений, от истинного значения при смещении приемника № 1 к приемнику № 2 составила 1,2 мм. СКО определения отклонений значений параметра, характеризующего

направление сдвига, вычисленного из результатов обработки спутниковых измерений, от истинного значения при смещении приемника № 1 к приемнику № 3 — 1,4 мм.

СКО определения разности между значениями параметра, характеризующего величину сдвига, и параметра, характеризующего направление сдвига, на линии приемник № 1 — приемник № 2 составила 1,9 мм. СКО определения разности между значениями параметра, характеризующего величину сдвига, и параметра, характеризующего направление сдвига, на линии приемник № 1 — приемник № 3 — 0,2 мм.

Полученные результаты эксперимента позволяют сделать следующие выводы.

Ошибка определения сдвига перемещаемого приемника, полученная из результатов спутниковых наблюдений, в десятки раз превышает ошибку отсчитывания по шкалам линейек. Следовательно, конструкция установки соответствует требованиям эксперимента.

Значения оценок точности, полученные авторами, не-

сколько меньше, чем приведенные в работе [4], однако порядок величин достаточно хорошо согласуется.

Длительности сессии наблюдений в 30 мин достаточно для разрешения многозначности результатов спутниковых наблюдений и получения значимых результатов.

СКО определения сдвига по высоте примерно в 1,5 раза больше СКО определения планового сдвига. Такое соотношение согласуется с результатами, полученными и получаемыми авторами в ходе их производственной деятельности.

СКО определения сдвига, характеризующая аппаратную точность комплекта геодезических спутниковых приемников в совокупности с программным обеспечением, существенно превышает значение в 1 мм. Из этого следует, что поставленная IAG задача по достижению миллиметрового уровня точности ко-

ординат пунктов геодезических сетей, безусловно, будет решена, но не в ближайшем будущем. Тем более, как было отмечено выше, на результаты спутниковых измерений действуют также иные источники ошибок.

▼ Список литературы

1. Christopher Jelkei. Geometric Reference Systems in Geodesy. Division of Geodesy and Geospatial Science. — School of Earth Sciences. Ohio State University, 2006. — 202 p.

2. The International Terrestrial Reference Frame (ITRF). — <http://itrf.ign.fr>.

3. Hofmann-Wellenhof B., Lichtenegger H., Collins J. Global Positioning System. Theory and Practice. — Second edition. — Wien, New York: Springer-Verlag, 1993. — 326 p.

4. Донец А.М. Геодезический мониторинг высотных зданий и сооружений с помощью высокоточных спутниковых методов // Геопрофи. — 2005. — № 5. — С. 17–19.



ООО «УГТ-ХОЛДИНГ»
<http://ugt-holding.com>

Поставка
Ремонт
Обучение
Метрология



Trade-in
Рассрочка
Лизинг
Тех. поддержка

Екатеринбург (343) 210-91-91
Санкт-Петербург (812) 910-91-20
Москва (495) 935-79-90
Самара (846) 276-35-55

Уфа (347) 256-92-20
Новосибирск (383) 233-50-09
Красноярск (391) 272-97-72
Нижний Новгород (831) 211-33-31