

Ш. САРКАР, П. БАНЕРДЖЕ, А. БОСЕ

ТРИДЦАТЬ ШЕСТЬ ЛЕТ РАБОТЫ ГЛОНАСС. ВЗГЛЯД ИЗ ИНДИИ

С момента ввода ГЛОНАСС в эксплуатацию в 1982 г. прошло 35 лет. Система стала первой глобальной альтернативой GPS и тем самым привлекла внимание пользователей во всем мире. В статье приведена краткая история ГЛОНАСС от возникновения концепции до развития, деградации и модернизации, а также обзор научных работ, в которых изложены аспекты ее разработки и преимущества использования как отдельно, так и совместно с другими глобальными навигационными спутниковыми системами (ГНСС). Рассмотрен опыт применения ГЛОНАСС в Индии в течение всего периода работы системы; в основу исследования положен систематический долгосрочный анализ работы в режиме реального времени на территории Индии и на первоначальном этапе, и на этапе восстановления и модернизации. Учитывая многолетний опыт применения ГЛОНАСС, приводятся рекомендации по дальнейшей популяризации и повышению качества ее работы в Индии. Обзор может быть полезен для более глубокого понимания возможностей и перспектив использования этой системы в регионе.

Ключевые слова: ГЛОНАСС, мультиГНСС-навигация.

Введение

Концепция ГЛОНАСС разрабатывалась в 1970-х гг. на основе опыта эксплуатации навигационных систем «Циклон», «Циклон-Б» и «Цикада», полученного в 1960-х [1]. Первый спутник ГЛОНАСС как элемент специализированной навигационной спутниковой системы со всепогодным глобальным охватом был запущен 12 октября 1982 г. Космический сегмент системы развернут в трех орбитальных плоскостях, угол между восходящими узлами которых составляет 120° . На каждой орбите находятся восемь спутников на равном удалении друг от друга. Каждый из них имеет системный номер, который обозначает соответствующую орбитальную плоскость и позицию в этой плоскости: номера 1–8 относятся к плоскости I, 9–16 – к плоскости II, а 17–24 – к плоскости III. Созвездие спутников использует метод множественного доступа с частотным разделением каналов (FDMA) в расширенном спектре. Он предусматривает передачу сигналов в двух диапазонах: L1, $1602,0 \text{ МГц} + n \times 0,5625 \text{ МГц}$ и L2, $1246,0 \text{ МГц} + n \times 0,4375 \text{ МГц}$, где n – номер частоты ($n = -7 \dots +6$).

После запуска первого спутника ГЛОНАСС передача сигналов в диапазоне 1610,6–1613,8 МГц сначала создавала помехи для радиотехнических астрономических наблюдений. По этой причине руководство соответствующих россий-

Саркар Шрейя. Приглашенный научный сотрудник, факультет физики, Университет г. Бардхамана (Индия).

Банердже Паритош. Приглашенный преподаватель, факультет физики, Университет г. Бардхамана.

Босе Аинидья. Старший научный сотрудник, факультет физики, Университет г. Бардхамана.

Научный редактор перевода д.т.н. Д. А. Кошаев.

ских организаций приняло решение о переводе сигналов ГЛОНАСС из запланированных диапазонов на более низкие частоты [2]. К 1990-м гг. ГЛОНАСС вышла на режим полномасштабной эксплуатации и стала полноценно функционирующей альтернативой своему американскому аналогу – GPS. С появлением ГЛОНАСС возникли предпосылки к ее использованию в мультиГНСС-решениях, несмотря на не слишком высокую надежность работы этой системы, поскольку отказавшие спутники вовремя не восполнялись. Сегодня, на 36-м году эксплуатации с момента запуска, ГЛОНАСС находится в превосходном рабочем состоянии. Ее оператором в настоящее время является Государственная корпорация по космической деятельности «Роскосмос». Статья посвящена насыщенным событиям истории ГЛОНАСС, особый акцент сделан на использовании системы в Индии. Кроме того, рассказывается об эволюции ГЛОНАСС, а также дан обзор опубликованной литературы по развитию и глобальным последствиям ее существования. Обсуждается опыт использования ГЛОНАСС в Индии как на ранних этапах эксплуатации, так и после обновления и модернизации. Наконец, рассмотрены проблемы и трудности, связанные с применением ГЛОНАСС в Индии как в качестве автономной системы, так и при реализации мультиГНСС-решений.

Ретроспектива эволюции ГЛОНАСС

К концу 2017 г. всего было запущено 135 спутников ГЛОНАСС 6 классов. С 2001 г. запускались только спутники класса ГЛОНАСС-М. Первый спутник класса ГЛОНАСС-К был запущен в 2011 г. В нем наряду со старыми сигналами FDMA используются сигналы с множественным доступом с кодовым разделением каналов (CDMA) на третьей частоте. Спутники каждого поколения последовательно совершенствовались с точки зрения технологий и сроков эксплуатации [2]. Спутники классов ГЛОНАСС-К2 и ГЛОНАСС-КМ в настоящее время находятся на стадии проектирования, их запуск первоначально планировался соответственно на 2015 и 2025 гг. [3]. Невзирая на то, с какой целью была реализована система ГЛОНАСС – в качестве дополнения к GPS или для выполнения задач обороны России, в конечном итоге она оказалась реально действующей альтернативой GPS, поскольку, будучи независимой, давала возможность дублирования и выбора системы. За 35 лет своего существования ГЛОНАСС прошла стадию и полностью рабочего созвездия спутников в середине 1990-х гг., и постепенной деградации в конце 1990-х гг. из-за неправильного технического обслуживания. В 2001 г. появились планы по ее обновлению, практическая реализация которых началась с 2004 г. К концу 2011 г. система была восстановлена и усовершенствована и возобновила работу [4]. Пользователи ГНСС вновь стали проявлять интерес к ГЛОНАСС, в связи с этим началось изучение этой системы как альтернативы GPS и как составляющей мультиГНСС. Благодаря географическому положению Индии на ее территории велика доступность мультиГНСС, что позволяет проводить здесь исследования по ГЛОНАСС.

В целях всестороннего изучения процесса эволюции ГЛОНАСС мы разделили время ее существования на 3 этапа.

Этап I. Запуск и эксплуатация (1982–2001)

Этот этап охватывает начало реализации программы ГЛОНАСС и короткий период успешной работы системы в качестве дополнения к GPS, в том числе

запуск 71 спутника с 1982 по 1995 гг. Полное созвездие из 24 спутников, выведенных на три орбиты, было развернуто 18 января 1996 г. Заинтересованность системой проявили пользователи во всем мире, и стали появляться исследования о ее пользе и преимуществах [5, 6, 7]. В середине 1990-х гг. количество работоспособных спутников ГЛОНАСС было удовлетворительным, но такая ситуация сохранялась недолго: к концу 1999 г. глобальный охват ГЛОНАСС сократился до 50%. За период с 1996-го по 2000-й г. было запущено лишь шесть новых спутников, и после 2000 г. из-за ненадлежащего и нерегулярного восполнения отказавших спутников возникли серьезные перебои в сигналах ГЛОНАСС даже в тех местах, где ранее отмечалась хорошая наблюдаемость. [4]. Согласно имеющимся документам и архивным данным, многие спутники ГЛОНАСС выходили из строя до окончания расчетного срока эксплуатации. В результате ГЛОНАСС стала непригодной к использованию ни в самостоятельном режиме, ни в сочетании с GPS. При наблюдении с территории Индии с мая 1998 г. по апрель 2001 г. количество рабочих спутников ГЛОНАСС сократилось с четырнадцати до шести [8].

Естественно, в такой ситуации получить непрерывное трехмерное (3D) решение было практически невозможно из любой точки наблюдения, и большую часть суток отмечалось полное отсутствие сигналов спутников ГЛОНАСС. Никаких планов по улучшению системы не появлялось. Разумеется, в этих обстоятельствах интерес к ГЛОНАСС резко упал.

Этап II. Пополнение и модернизация (2001–2010)

На данном этапе были проведены работы по восстановлению и модернизации деградировавшего созвездия спутников ГЛОНАСС. В начале 2000-х гг. Президент РФ лично проявил внимание к системе, и ее восстановление стало одной из приоритетных задач правительства. В августе 2001 г. было заявлено о запуске федеральной целевой программы «Глобальная навигационная система 2002–2011» (постановление Правительства РФ № 587). Программа предусматривала полное восстановление созвездия спутников к 2009 г. [9] и состояла из трех стадий:

Стадия I (2004–2005). В 2004 г. российские должностные лица обещали к 2007 г. обеспечить требуемый минимум в количестве 18 рабочих спутников в созвездии. К 2010 г. предполагалось довести количество спутников до полного состава – 24-х [10]. В 2005 г. было официально объявлено, что система будет готова к 2008 г., а первый вице-премьер заявил, что ГЛОНАСС станет доступна для военных и гражданских применений к концу 2007 г. [11].

Стадия II (2006–2007). Количество спутников предполагалось восстановить сначала до 18, при этом к 2006 г. планировалось внедрение новых спутников класса ГЛОНАСС-М с увеличенным сроком службы, улучшенными характеристиками часов, межспутниковой радиосвязью и усовершенствованными антеннами [12]. Кроме того, на данном этапе возник план ввода второй гражданской частоты сигналов. Президент РФ заявил, что приемники ГЛОНАСС должны быть дешевле и качественнее, чем приемники GPS, и 18 мая 2007 г. был подписан указ Президента о бесплатном предоставлении услуг без каких-либо ограничений сигналов для всех пользователей ГЛОНАСС [13, 14]. В этой связи в 2006 и 2007 гг. были выделены средства на обновление и модернизацию системы [15].

Стадия III (2008–2010). Предполагалось довести количество спутников в системе до 24-х и при этом внедрить компактные и улучшенные спутники нового класса – ГЛОНАСС-К [9, 16]. Планы включали модернизацию наземного ком-

плекса управления, ввод третьей частоты сигналов, а также улучшение характеристик навигационного сигнала в соответствии с более жесткими навигационными требованиями.

Российские власти выступили с инициативой сотрудничества с Индией и Китаем, а также взаимодействия с США. В 2004 г. во время визита Президента РФ в Индию между двумя странами были подписаны «Межправительственное комплексное соглашение о сотрудничестве в области исследования и использования космического пространства в мирных целях» и «Соглашение о долгосрочном сотрудничестве в области совместного развития, эксплуатации и использования российской глобальной навигационной спутниковой системы ГЛОНАСС» [17]. В 2005 г. было подписано еще одно соглашение – о разработке оборудования для использования сигналов ГЛОНАСС в коммерческих целях и о проектировании и запуске спутников классов ГЛОНАСС-М и ГЛОНАСС-К на геостационарную орбиту на индийских ракетах-носителях GSLV [18]. Стороны обсудили возможность запуска спутников ГЛОНАСС на индийских ракетах-носителях, разработанных Индийской организацией космических исследований (ISRO), в обмен на предоставление индийским партнерам доступа к навигационным данным ГЛОНАСС. В декабре 2006 г. состоялась встреча Российско-американской рабочей группы по обеспечению взаимодополняемости и совместимости систем GPS и ГЛОНАСС (WG-1), на которой обсуждались вопросы проработки некоторых аспектов усовершенствования ГНСС, а на Международном форуме по спутниковой навигации в 2007 г. было принято решение о взаимовыгодной системной интеграции GPS и ГЛОНАСС [19].

Благодаря усилиям, предпринятым на данном этапе, с 2001 по 2010 г. было произведено 42 регулярных запуска спутников системы, в том числе 34 спутников класса ГЛОНАСС-М. В дальнейшем ежегодно производилось по три запуска для пополнения и восстановления полного созвездия ГЛОНАСС [20]. В 2016 г. премьер-министр Индии и Президент РФ договорились о создании, развитии и использовании наземных измерительных станций на территории обеих стран, чтобы совместно совершенствовать свои навигационные системы. В рамках данного соглашения Россия запланировала устройство своей наземной базы в Бангалоре (Индия) для приема сигналов ГЛОНАСС, а Индия согласилась разместить свою базу в Новосибирске [18].

Этап III. Эксплуатация восстановленной ГЛОНАСС (2010–2017)

На данном этапе осуществлялась эффективная эксплуатация модернизированного созвездия спутников ГЛОНАСС, что проложило путь к успешной разработке мультиГНСС. После продолжительного периода запусков спутников нового класса в октябре 2011 г. было объявлено о полном восстановлении созвездия ГЛОНАСС, состоящего из 31 спутника, 24 из которых находились в рабочем режиме [20]. После того как реконструкция созвездия ГЛОНАСС полностью завершилась, к 2017 г. было произведено еще 16 запусков с равными интервалами, чтобы обеспечить устойчивую работу системы. Из этих 16 спутников 14 относились к классу ГЛОНАСС-М и два – к классу ГЛОНАСС-К (начала К1, затем К2). Последний запуск состоялся 22 сентября 2017 г. Подробная история запусков спутников ГЛОНАСС описана в [21, 22], включая информацию о последовательности запусков и общем количестве спутников. Серии запусков спутников ГЛОНАСС по годам начиная с 1996 г., а также общее количество спутников в созвездии показаны на рис. 1.

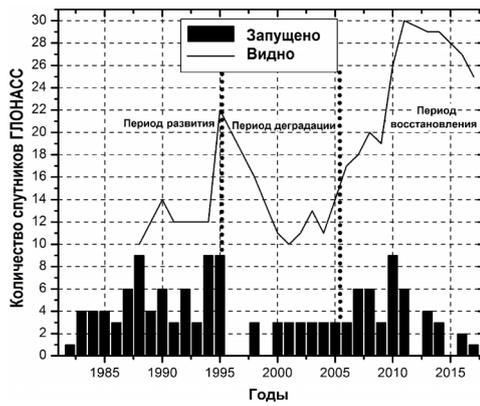


Рис. 1. История запусков спутников ГЛОНАСС

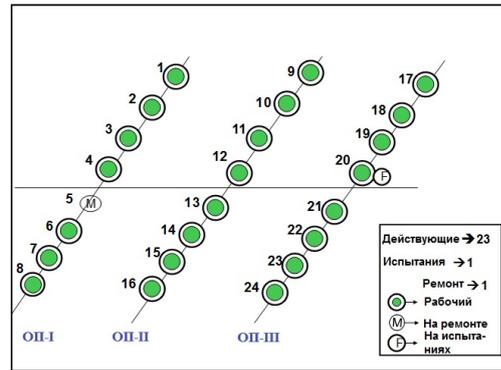


Рис. 2. Созвездие спутников ГЛОНАСС по состоянию на 30.04.18 г.

Благодаря принятым мерам с 2010 г. в созвездии используются не менее 24 спутников. Текущее состояние (30.04.18 г.) созвездия ГЛОНАСС представлено на рис. 2: на орбите находятся всего 25 спутников, 23 из которых штатно эксплуатируются, один находится на обслуживании и один – в режиме летных испытаний.

Обзор статей о ГЛОНАСС и ее влиянии на развитие ГНСС

В конце 1990-х гг. ГЛОНАСС была единственной действующей глобальной альтернативой GPS, которая в то время функционировала в режиме селективной доступности сигналов. После восстановления ГЛОНАСС снова стала первой полностью рабочей глобальной системой наряду с GPS, в то время как системы Galileo и BeiDou только разрабатывались. Рассмотрим опубликованные отчеты о глобальном применении, преимуществах и ожиданиях от использования ГЛОНАСС.

Исследование состояния созвездия ГЛОНАСС с 1995 по 1997 г., когда система была полностью в рабочем состоянии, представлено в [5]. Систематическое изучение совместимости ГЛОНАСС и GPS описано в работе [23], уменьшение количества доступных спутников ГЛОНАСС обсуждалось в работах [5] и [8]. Полная потеря спутников ГЛОНАСС к концу 2001 г. было спрогнозировано в [5]. В работе [8] был сделан прогноз, согласно которому к концу 2001 г. должно было остаться только четыре действующих спутника, а полная потеря спутников ГЛОНАСС – произойти к третьему кварталу 2004 г. По данным [24], к марту 2001 г. в ГЛОНАСС осталось восемь действующих спутников, а согласно [25] в начале 2000 г. их было всего девять, причем два из них были доступны на территории Объединенных Арабских Эмиратов в течение длительного времени, а шесть – только несколько часов в сутки.

Государственная политика по модернизации ГЛОНАСС подробно рассмотрена в [26]. В 2007 г. была опубликована статья [27], в которой рассматривались вопросы разработки системы Galileo наряду с GPS и ГЛОНАСС. В 2009 г. вышла работа [28] с анализом ситуации, когда на орбите находилось 20 спутников ГЛОНАСС – 18 действующих и 2 на обслуживании. В интернете есть много сайтов, где можно найти информацию о текущем состоянии созвездия ГЛОНАСС, например [29]. Методы повышения точности навигационного решения в сложных условиях с помощью GPS, ГЛОНАСС и QZSS были описаны в [30].

Аналогичное исследование возможностей использования мультиГНСС (с GPS, ГЛОНАСС и Galileo) было выполнено в 2010 г. [31]. Однако все эти работы были сосредоточены на проблеме доступности с точки зрения глобального охвата, и в большинстве случаев характер доступности был спрогнозирован теоретическими методами. Реальный сценарий доступности навигационных спутниковых систем на средних широтах, в том числе в Индии, был впервые рассмотрен в [32] (2001 г.). Эти исследования имели значение в основном для изучения преимуществ использования ГЛОНАСС с учетом селективной доступности GPS. Точность и надежность решений ГЛОНАСС как автономной системы были изучены несколькими исследователями. Так, в [33] рассмотрены характеристики ГЛОНАСС на стадии инициализации (1992 г.). Аналогичной теме посвящены работы [34–36, 23, 24]. Тем не менее, несмотря на огромный потенциал, ГЛОНАСС как самостоятельная система не вполне справилась с задачей точного позиционирования, а из-за проблем с полнотой созвездия многие пользователи усомнились в ее надежности [12]. Идея совместного использования GPS и ГЛОНАСС была рассмотрена в [37] (2001 г.). Аналогичные попытки были предприняты авторами [38], чтобы повысить уровень доверия у пользователей мультиГНСС (2007 г.). Изменение геометрического фактора в условиях ограниченной видимости было изучено в [39] с использованием только ГЛОНАСС (2007 г.). Модернизация, восстановление и точность ГЛОНАСС были исследованы в ряде работ индийских ученых [4, 40, 41]. Методы применения мультиГНСС для решения проблем в неблагоприятных условиях приема сигнала ГНСС рассмотрены в [42]. После того как в 2011 г. созвездие было восстановлено, возможность использования ГЛОНАСС в качестве самостоятельной альтернативы GPS или в составе мультиГНСС снова вызвала интерес, о чем свидетельствуют работы [31, 43, 44, 45]. Развитие и эффективность функционирования ГЛОНАСС в последнее время были также рассмотрены в [46–49].

Эффективность применения ГЛОНАСС в Индии

Доступность. Ожидается, что Индия благодаря своему географическому положению получит преимущества от реализации сценария с использованием мультиГНСС [50]. В рамках широкомасштабных многолетних исследований были изучены и стадия первоначального запуска и эксплуатации, и стадия восстановления; рассматривались доступность, преимущества и потенциал использования ГЛОНАСС в Индии. В данном разделе представлен краткий обзор этих работ, которые могут пролить свет на повышение потенциала использования ГЛОНАСС в Индии и в соседних регионах, расположенных на средних широтах.

До мая 2000 г. полностью работоспособная ГЛОНАСС давала возможность использовать ее в качестве альтернативы GPS или совместно с GPS в интегрированном режиме, когда сигналы GPS не всегда были доступны. Для оценки эффективности ГЛОНАСС было проведено долгосрочное исследование с использованием данных, собранных в достаточно удаленных друг от друга точках (Калькутта, Нью-Дели и Бангалор) [6, 7]. Данные по доступности ГЛОНАСС в Индии до 2001 г. представлены в табл. 1.

Интегрированные приемники GPS–ГЛОНАСС, которые применялись в ходе исследований, обеспечивали передачу в соответствии с требованиями протокола Национальной (США) ассоциации по морской электронике (NMEA) стандартного потока данных, включая навигационные решения и другие сопутствующие параметры (значения геометрических факторов, отслеживаемые и используе-

мые спутники с соответствующими значениями высоты, азимута, интенсивности сигнала и т.д.). После 2013 г. использовались данные NMEA, полученные с помощью приемника геодезического класса. Из потока данных NMEA выделяли полезную информацию и проводили ее анализ для получения представленных ниже результатов.

Т а б л и ц а 1

Доступность спутников ГЛОНАСС в Индии (декабрь 1998 – январь 2001)									
Всего спутников в созвездии ГЛОНАСС→	10-11			12-15			15 и более		Макс. кол-во
	Вероятность видимости (%)			Вероятность видимости (%)			Вероятность видимости (%)		
Место наблюдений ↓	0-1	2-3	4 и более	Хотя бы 1	2 и более	4 и более	3 и более	4 и более	
Нью-Дели	8-14	52	5-35	100	95-100	5-55	80	50	6
Калькутта	2-13	50	20-75	100	95-100	5-80	98	69	8
Бангалор	8-20	50	5-45	100	65-95	5-55	100	75	7

Из приведенных результатов можно сделать вывод, что даже при наличии 15 и более спутников в созвездии ГЛОНАСС получить трехмерное решение было не всегда возможно с помощью только ее одной, но при этом она в целом повышала доступность ГНСС-решений.

После реализации планов модернизации и восстановления созвездия ГЛОНАСС в 2010 г. наступил благоприятный момент для повторного изучения доступности ГЛОНАСС и повышения доверия к этой системе. Соответствующие исследования были начаты в Индии в 2012 г. Данные для этих исследований были получены из различных отдаленных друг от друга точек по всей стране. Данные о доступности спутников ГЛОНАСС с углами возвышения над горизонтом более 5° представлены в табл. 2 [45].

Т а б л и ц а 2

Доступность ГЛОНАСС в Индии с углом возвышения более 5° (2012–2013)						
Место	Видимые спутники			Используемые спутники		
	Макс.	Мин.	Среднее	Макс.	Мин.	Среднее
Бардхаман	12	5	8,41	11	3	7,38
Ченнаи	11	6	8,57	10	4	7,25
Гоа	11	6	8,46	9	4	5,47
Нагпур	11	5	8,81	10	5	7,48
Дехрадун	12	9	10,09	11	7	8,79
Шиллонг	12	7	8,21	10	4	8,09

Из табл. 2 видно, что в Индии было достаточно спутников ГЛОНАСС для получения полноценного трехмерного навигационного решения, когда требуется минимум четыре спутника, за исключением короткого периода в Бардхамане, что может быть связано с неисправностью приемника или кратковременными атмосферными помехами. Таким образом, теперь индийские пользователи могут изучить преимущества совместной работы GPS+ГЛОНАСС. Можно ожидать,

что в Индии будут видимы в среднем от 7 до 9 спутников ГЛОНАСС с углом возвышения более 5° , пять из которых можно будет использовать для получения навигационного решения.

Как действующая альтернатива GPS ГЛОНАСС имеет ряд преимуществ для пользователей. Одно из них – повышение доступности сигналов спутников в условиях ограниченной видимости (например, городские каньоны, густая листва, открытые рудники). В таких ситуациях GPS и ГЛОНАСС могут дополнять друг друга, обеспечивая бесперебойную работу. В течение 2012 г. мультисистемный ГНСС-приемник работал в режиме GPS+ГЛОНАСС с обработкой данных лишь от спутников с большими углами возвышения для имитации ограниченной видимости. Опираясь на соответствующие сообщения NMEA, определено количество отслеживаемых спутников в отдельных созвездиях. Полученные результаты представлены в табл. 3, из которой видно, что в большинстве случаев для углов возвышения 45° при работе приемника в интегрированном режиме GPS+ГЛОНАСС минимальные требования для трехмерного решения обеспечиваются только совместным использованием GPS и ГЛОНАСС [45].

Относительно последней строки табл. 3, где указана комбинация из трех спутников GPS и одного ГЛОНАСС, следует заметить, что такое созвездие предполагает решение навигационной задачи с уменьшением количества неизвестных с 5 до 4. При этом программное обеспечение приемника фиксирует либо значение высоты (обеспечивает лишь режим 2D-навигации), либо разницу часов GPS и ГЛОНАСС. Эту разницу можно взять из предыдущих полномерных навигационных решений или, как в случае с ГЛОНАСС-М, из сообщений спутника. В последнем случае среднее квадратическое отклонение разности часов GPS и ГЛОНАСС составляет до 30 нс.

Т а б л и ц а 3

Видимость и возможность использования спутников GPS и ГЛОНАСС для больших углов возвышения			
Угол возвышения	Место	Используемые спутники GPS (всего готовых к использованию с углом возвышения более 5°)	Используемые спутники ГЛОНАСС (всего готовых к использованию с углом возвышения более 5°)
30°	Ченнаи	5 (12)	4 (9)
	Баласор	5 (13)	4 (6)
	Пилани	5 (10)	4 (9)
	Бардхаман	5 (9)	5 (9)
45°	Ченнаи	3 (13)	2 (10)
	Баласор	2 (12)	4 (9)
	Дехрадун	3 (12)	3 (9)
	Бардхаман	3 (9)	1 (8)

Геометрия созвездия спутников. Количественной характеристикой геометрии расположения наблюдаемых спутников, используемых в навигационном

решении, служит пространственный геометрический фактор, называемый в англоязычной литературе Position Dilution of Precision (PDOP). Данные для Индии за 1999–2000 гг. показывают, что в 90% случаев значения PDOP составляют от 1,5 до 1,8 при совместной обработке сигналов ГЛОНАСС с GPS, тогда как эти значения только для GPS остаются на уровне порядка 2,2. При добавлении лишь одного или двух спутников ГЛОНАСС в подходящих позициях на небе к минимальному числу доступных спутников GPS значения PDOP улучшаются.

Суммарные вариации PDOP, полученные в лаборатории ГНСС (Бардхаман) для GPS и ГЛОНАСС по отдельности и для интегрированного режима GPS+ГЛОНАСС в феврале 2012 г., то есть после обновления ГЛОНАСС, представлены на рис. 3. Из рисунка видно, что практически во всех случаях значения PDOP для совместной работы GPS+ГЛОНАСС не превышают 1,6; аналогичные значения для GPS и ГЛОНАСС по отдельности составляют соответственно 2,4 и 3,4. Схожие результаты получены и в другие месяцы наблюдений. На основании этих результатов можно сделать вывод о том, что интегрированный режим обеспечивает более низкие значения PDOP, несмотря на то что геометрия спутников GPS лучше, чем у ГЛОНАСС [51].

Представленные в статье наблюдения и обсуждения основаны на данных NMEA, полученных непосредственно со стандартных ГНСС-приемников (GPS+ГЛОНАСС), имеющих в свободной продаже. Эти приемники не предоставляют пользователю сырые данные для получения решения. Встроенные процессоры приемников находят навигационное решение с помощью значений псевдодалности и другой имеющейся необходимой информации и выдают координаты решения и другие данные – PDOP, азимуты и углы восхождения спутников, отношение «сигнал/шум», которые применяются для анализа. Приемники используют разницу во времени между GPS и ГЛОНАСС для решения, построенного на основе навигационных данных по полученным сигналам.

Кроме того, нужно отметить, что в данной работе мы рассматривали только вопросы улучшения видимости и геометрии спутников в интегрированном режиме работы GPS+ГЛОНАСС, основываясь на значениях, полученных от приемников.

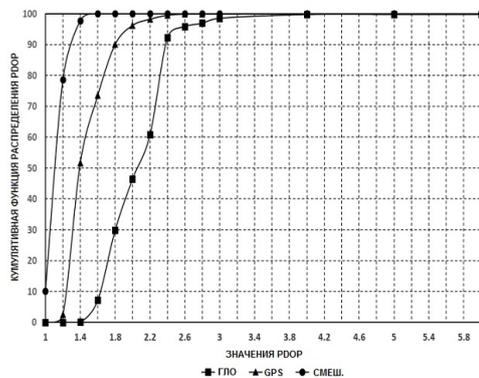


Рис. 3. Кумулятивная функция распределения PDOP, февраль 2012 г. (Бардхаман)

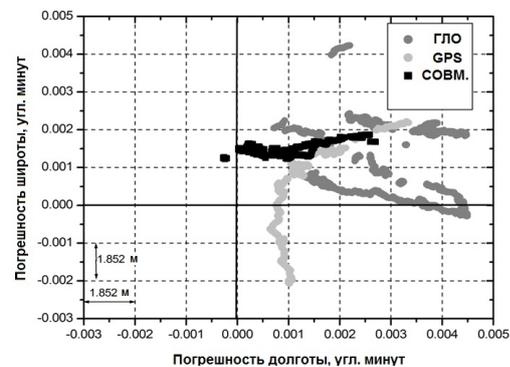


Рис. 4. Погрешности горизонтальных координат в угловых минутах, 4 апреля 2014 г. Данные за 1 час на частоте 1 Гц для каждого режима (Бардхаман); 0 – истинное местоположение

Точность навигационных решений. В данном подразделе рассматриваются навигационные решения, полученные в режиме ГЛОНАСС+GPS. Следует еще

раз подчеркнуть, что для анализа использовались данные NMEA, полученные с помощью коммерческих приемников GPS–ГЛОНАСС, работающих на одной частоте (L1). Методика взвешивания в данном случае не применялась. Задача исследования заключалась в изучении точностных возможностей системы ГЛОНАСС в Индии с помощью коммерческих приемников низкой и средней ценовой категории и в обобщении преимуществ использования восстановленной системы.

Сначала на неподвижном основании были оценены погрешности выработки широты и долготы в режимах GPS, ГЛОНАСС и GPS+ГЛОНАСС [1 час, 1 Гц] с применением методов, описанных в [52]. Полученные результаты представлены на рис. 4, согласно которому наименьшие изменения показаний отмечаются в интегрированном режиме GPS+ГЛОНАСС, а наибольшие – в режиме ГЛОНАСС, что говорит о преимуществе использования режима ГЛОНАСС+GPS [45].

Теперь рассмотрим результаты систематических исследований погрешностей с помощью методов, описанных в [6, 7]. Погрешности решений на стадии разработки ГЛОНАСС при наличии и отсутствии селективного доступа по системе GPS показаны на рис. 5 и 6 [6], где по оси абсцисс отложена погрешность в метрах, а по оси ординат – вероятность ее реализации в процентах (аналогично см. рис. 7 и 8).

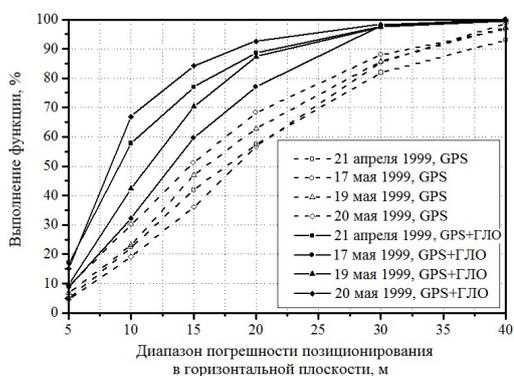


Рис. 5. Кумулятивные функции распределения радиальной погрешности позиционирования в горизонтальной плоскости в условиях селективного доступа (1999)

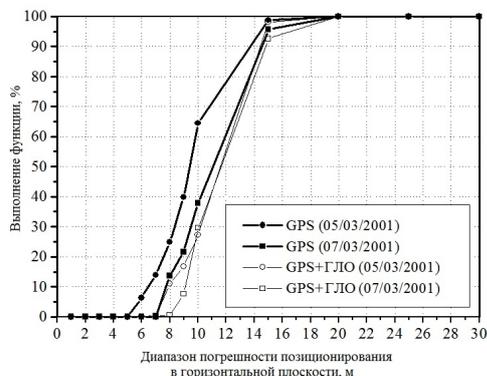


Рис. 6. Кумулятивные функции распределения радиальной погрешности позиционирования в горизонтальной плоскости после отключения селективного доступа (2001)

Как видно из рис. 5 и 6, ГЛОНАСС способствует улучшению решений при ее добавлении к GPS в условиях селективного доступа. Вместе с тем решения только GPS несколько лучше по сравнению с комбинированным режимом без ошибок селективного доступа. В последующих разделах показано, что результаты ГЛОНАСС заметно улучшились после ее восстановления и модернизации.

Уровень точности, который обеспечивает ГЛОНАСС на территории Индии, исследовался аналогичным образом с помощью одностотной оригинальной платы (Rx #1) для GPS+ГЛОНАСС и двухчастотного геодезического приемника (Rx #2) для мультиГНСС. При этом оба прибора работали на одной частоте (L1) на протяжении 2013 и 2014 гг. по данным в Бардхамане [45]. Расчет кумулятивных функций распределения радиальной погрешности позиционирования в горизонтальной плоскости и в пространстве производился методом, описанным в [52]. Результаты представлены на рис. 7 и 8 для Rx #1 и Rx #2 соответственно.

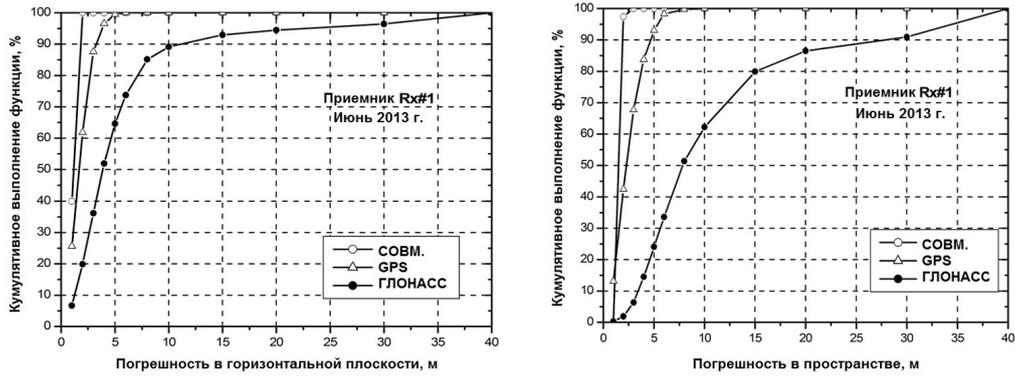


Рис. 7. Кумулятивные функции распределения радиальной погрешности позиционирования в горизонтальной плоскости (*слева*) и в пространстве (*справа*) при использовании приемника Rx #1

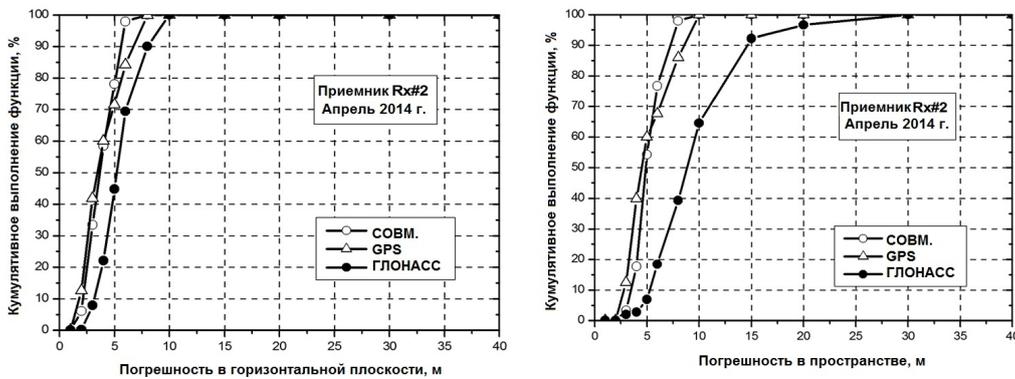


Рис. 8. Кумулятивные функции распределения радиальной погрешности горизонтальных (*слева*) и пространственных (*справа*) координат, полученных приемником Rx #2

Из рисунков видно, что решения только по ГЛОНАСС уступают решениям только по GPS. Однако совместная работа GPS+ГЛОНАСС обеспечивает более высокую точность по сравнению с работой только GPS для обоих приемников с различными возможностями.

Другое исследование было выполнено для сравнения характеристик спутников класса ГЛОНАСС и ГЛОНАСС-М при совместной работе с GPS на частоте L1 [45]. При фиксированном количестве спутников GPS спутники ГЛОНАСС добавлялись последовательно в течение нескольких минут. Погрешности независимых решений рассчитывали по той же методике, что и в [52]. В работе использовались данные, собранные в 2001 г. по Калькутте и в 2015 г. по Бардхаману (расстояние между городами составляет 100 км). Результаты представлены в табл. 4.

Следует отметить, что использование одного спутника ГЛОНАСС при наличии семи спутников GPS может быть эффективным только при условии, что до этого приемник получил оценку расхождения между шкалами времени GPS и ГЛОНАСС.

Зависимость точности навигационных одночастотных решений от количества спутников ГЛОНАСС и ГЛОНАСС-М при фиксированном количестве GPS					
Число спутников GPS	Число спутников ГЛОНАСС	Среднее значение радиальной погрешности пространственного позиционирования, м		Среднеквадратическое значение радиальной погрешности пространственного позиционирования, м	
		ГЛОНАСС (2001)	ГЛОНАСС-М (2015)	ГЛОНАСС (2001)	ГЛОНАСС-М (2015)
07	01	19,03	3,78	2,67	0,15
07	02	14,38	5,00	0,42	0,53
07	03	14,34	5,42	1,20	0,48
07	05	13,62	5,47	0,30	0,24

Из табл. 4 видно, что новые спутники класса ГЛОНАСС-М вносят более существенный вклад в повышение точности решений и превосходят спутники класса ГЛОНАСС при совместной работе. Ожидается, что благодаря расширенным возможностям и повышенным характеристикам современной ГЛОНАСС она вызовет больший интерес у пользователей ГНСС.

Для сопоставления точности разных режимов на рис. 9 представлены погрешности горизонтальных координат при циклической смене режимов GPS, ГЛОНАСС и GPS+ГЛОНАСС через каждые 10 мин. Этот эксперимент проводился в мае 1999 г., когда GPS еще обременялась селективным доступом. Аналогичный эксперимент, результаты которого показаны на рис. 10, был повторно проведен в марте 2013 г. Резкое изменение в значениях решений было отмечено при переходе из режима GPS в режим ГЛОНАСС. Решения, полученные в интегрированном режиме GPS+ГЛОНАСС, отличались более высоким качеством и устойчивостью [53]. Внезапные скачки значений в решениях при переходе из режима GPS в ГЛОНАСС или из ГЛОНАСС в смешанный режим недвусмысленно указывают на несостоятельность математических инструментов/алгоритмов, применяемых в приемниках, в решении проблемы совместимости GPS и ГЛОНАСС. Это может быть связано с местоположением, например из-за ограниченной применимости используемых алгоритмов на территории Индии. Более надежный и эффективный алгоритм, подходящий для этой географической зоны, позволит улучшить совместную работу GPS и ГЛОНАСС [12].

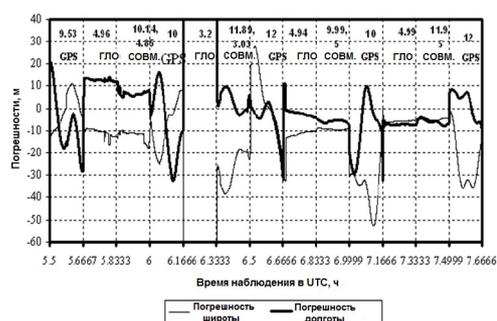


Рис. 9. Погрешности широты (тонкая линия) и долготы в метрах во время действия селективного доступа (Калькутта, 17 мая 1999 г.)

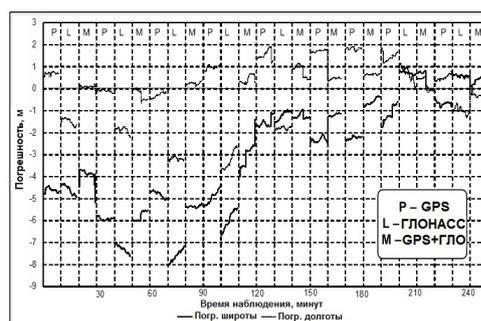


Рис. 10. Погрешности широты и долготы в метрах без селективного доступа (Бардхаман, март 2013 г.)

Таким образом, ГЛОНАСС еще на раннем этапе эксплуатации во времена действия селективного доступа в GPS и после своего восстановления и модернизации поддерживала комбинированный режим с GPS, тем самым доставляя многочисленные преимущества сообществу пользователей в индийском регионе. Ожидается, что, находя новые области применения, ГЛОНАСС обеспечит системную независимость, надежность и широкий выбор услуг для пользователей.

Это подтверждается и тенденциями рынка ГНСС-приемников, в частности тем, что производители чипсетов для ГНСС предлагают потребителям новые чипы с поддержкой ГЛОНАСС, а также ежегодным появлением в продаже новых мобильных телефонов с возможностью приема и обработки сигналов ГЛОНАСС. Это согласуется с прогнозом роста потребительского рынка ГНСС-приемников на 6,4% в год в 2015–2020 гг. [54]. Тем не менее для более широкого и эффективного использования ГЛОНАСС необходимо надлежащим образом устранить имеющиеся при этом проблемы, после чего ГЛОНАСС сможет повысить свою значимость среди ГНСС. Некоторые касающиеся этого вопросы обсуждаются в следующем разделе.

Проблема популяризации ГЛОНАСС

1 апреля 2014 г. газета «Известия» сообщила о системном сбое ГЛОНАСС [55]. Все спутники ГЛОНАСС транслировали искаженную информацию в течение 11 часов (с 17.00 до 04.00 следующего дня по восточному поясному времени США). По этой причине система неожиданно стала абсолютно непригодной для использования приемниками ГЛОНАСС по всему миру. Согласно имеющимся отчетам, одной из вероятных причин была ошибка загрузки эфемерид в программное обеспечение спутников. По данным некоторых других источников [55, 56], неисправность ГЛОНАСС была вызвана перезагрузкой каждого спутника во время пролета над станциями управления в северном полушарии в течение примерно 12 часов. Корректная работа системы была полностью восстановлена в короткие сроки [56]. Тем не менее 14 апреля 2014 г. восемь спутников ГЛОНАСС одновременно вышли из строя примерно на полчаса, и большинство приемников с поддержкой ГЛОНАСС игнорировали сигналы позиционирования от этих спутников. В это же время один из спутников системы был выведен из эксплуатации для проведения техобслуживания. Таким образом, сложилась ситуация, когда спутников ГЛОНАСС оказалось слишком мало для глобального покрытия без привлечения других ГНСС [57]. По этой причине для обеспечения высокой степени доверия к системе оператору необходимо принять эффективные меры по предотвращению подобных инцидентов с ГЛОНАСС.

Еще одним ограничением для использования созвездия ГЛОНАСС является неудовлетворительная видимость ее спутников на высоких углах возвышения в течение длительных интервалов времени на территории Индии. В ходе наблюдений в режиме реального времени было замечено, что на протяжении суток возникают ситуации, когда в течение некоторого периода не видно ни одного спутника ГЛОНАСС с углом возвышения более 50° (более 2 часов для 60° и более часа для 50° два раза в сутки). Эта ситуация представлена на рис. 11 по данным от 6 марта 2018 г., полученным в Бардхамане. В условиях ограниченной видимости где открыта только самая верхняя часть небесной полусферы, например в городских каньонах, отсутствие спутников ГЛОНАСС с большими углами восхождения может представлять собой серьезную проблему для бесперебойной навигации. Это явление связано со спецификой построе-

ния орбиты, поэтому необходимо принять соответствующие меры для решения данной проблемы при планировании миссий с использованием ГЛОНАСС. Вместе с тем использование сразу нескольких ГНСС смягчает ситуацию [58].

В работе [45] авторы продемонстрировали эксперимент с использованием решений, полученных из NMEA-сообщений приемников. Было установлено, что увеличение количества спутников ГЛОНАСС вносит пропорциональный вклад в повышение точности интегрированного режима GPS+ГЛОНАСС. Этот результат, представленный на рис. 12, создает основу для понимания вклада ГЛОНАСС в работу интегрированной системы. Как уже говорилось, добавление одного спутника ГЛОНАСС к полному созвездию GPS принесет положительный результат, только если в приемнике будет использоваться дополнительная информация о расхождении шкал времени GPS и ГЛОНАСС.

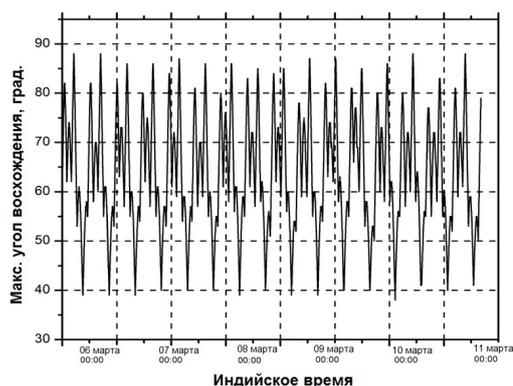


Рис. 11. Максимальный угол возвышения в градусах у спутников ГЛОНАСС в точке наблюдения Бардхамана, Индия, 6–11 марта 2018 г.

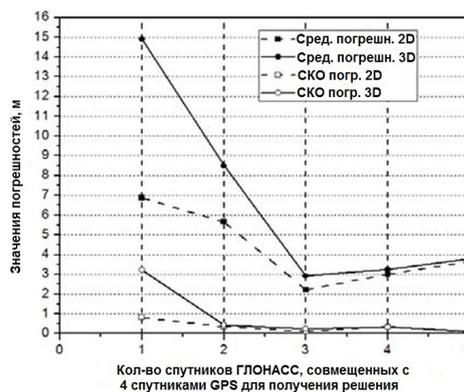


Рис. 12. Характеристики погрешностей позиционирования в метрах при добавлении к 4 спутникам GPS различного числа спутников ГЛОНАСС при работе в интегрированном режиме

Рис. 12 свидетельствует о том, что добавление спутника ГЛОНАСС к фиксированному количеству спутников GPS позволяет повысить точность решения. Вместе с тем это справедливо только при небольшом количестве используемых спутников GPS, если их >4 , то ситуация остается практически неизменной [45]. Это повторяющееся наблюдение требует более глубокого изучения вопроса оптимизации количества спутников в различных созвездиях мультиГНСС для достижения максимальной эффективности.

Спутник класса ГЛОНАСС-К был введен в созвездие в 2011 г., но в течение последующих шести лет он постоянно находился в режиме летных испытаний и остается в этом статусе по сей день, что нехарактерно для нового поколения спутников классов ГЛОНАСС. Такие ситуации могут вызвать сомнения у пользователей ГЛОНАСС и негативно повлиять на степень доверия к системе [59]. Пользователи ГЛОНАСС во всем мире с нетерпением ждут момента, когда они смогут воспользоваться преимуществами усовершенствованных спутников класса К, поэтому необходимо принять меры по вводу этих спутников и существующего спутника класса К1 в эксплуатацию и обеспечить их работу сразу после новых запусков.

Еще одним критическим фактором, влияющим на популярность ГЛОНАСС в Индии, является ограниченное производство качественных, компактных и недо-

рогих модулей с поддержкой ГЛОНАСС. В индийском сегменте рынка ГЛОНАСС преобладают либо дорогостоящие приемники геодезического класса, либо дешевые, но низкокачественные модули, которые зачастую могут негативным образом влиять на доверие потенциальных пользователей ГНСС [59].

Хотя ГЛОНАСС начала свой путь немного позже, чем GPS, она оказалась способной поддерживать совместную работу мультисистемных приемников спутниковой навигации, давая пользователям множество преимуществ. Вместе с тем, возможно из-за недоступности системы в первом десятилетии XXI века, ГЛОНАСС уступает GPS в популярности, по крайней мере в Индии. Поскольку модули ГНСС с поддержкой ГЛОНАСС стали наконец доступны, индийское сообщество пользователей ГНСС нуждается в более активном и устойчивом повышении осведомленности о ГЛОНАСС и ее потенциале.

Выводы

В статье по данным многочисленных источников кратко рассмотрена история ГЛОНАСС за последние 35 лет и дан обзор ее преимуществ с точки зрения пользователей из Индии. ГЛОНАСС доказала свой потенциал в качестве важной составляющей мультисистемных решений в спутниковой навигации, обеспечивая резервирование и независимость системы наряду с некоторыми другими эксплуатационными преимуществами, что привлекло внимание индийских пользователей. Несмотря на то что ГЛОНАСС уступает GPS при автономном применении, она позволяет существенно повысить эффективность в интегрированном режиме. ГЛОНАСС обладает коммерческим потенциалом благодаря своим преимуществам и доступности на развивающемся рынке Индии. Тем не менее, чтобы повысить популярность и увеличить количество пользователей этой системы, поставщики услуг должны тщательно изучить вопрос стоимости. Данная статья может оказаться полезной для индийских пользователей ГНСС в плане понимания потенциала ГЛОНАСС и повышения их уверенности в возможности эффективного использования этой системы.

Благодарности

Авторы выражают благодарность Организации оборонных исследований и разработок (Defence Research and Development Organization, DRDO) при Правительстве Индии за оказанную финансовую поддержку (код проекта: ERIP/ER/DG-MSS/990516601/M/01/1658).

ЛИТЕРАТУРА

1. **Testoyedov, N.**, ed., *Siberian Road to Space*, Krasnoyarsk: Polikor Ltd, 2nd ed., 2014.
2. **Langley, R. B.**, GLONASS: past, present and future, *GPS World*, November, 2017, pp 44–49.
3. <https://beebom.com/what-is-GLONASS-and-how-it-is-different-from-gps/>, accessed 08.12.17.
4. **Bose, A. and Sarkar, S.**, Revitalized GLONASS constellation status in mid 2010, *European Journal of Navigation*, 2010, vol. 8, no. 2, pp. 45–46.
5. **Holmes, D., Last, A. and Basker, S.**, GLONASS system performance, *Proc. ION GPS 1998*, Nashville, TN, USA, 15–18 September, 1998, pp. 1599–1603.
6. **Banerjee, P., Bose, A. and Dasgupta, A.**, A study on the utility of combined use of GPS and GLONASS constellations in India, *The Asian GPS Conference*, New Dehli, 29 October 2001.
7. **Banerjee, P., Bose, A. and Dasgupta, A.**, The usefulness of GLONASS for positioning in the presence of GPS in Indian subcontinent, *Navigation, Journal of Institute of Navigation*, 2002, vol. 55, no. 3, pp. 463–475.

8. **Rooney, E. and Last, A.**, GLONASS: As good as it could be, *Proc. ION GPS 1999*, 14–17 September 1999, Nashville, TN, USA, pp. 1363–1368.
9. **GLONASS should be cheaper, better than GPS**, *RIA Novosti*, 12 March 2007, , 20 August, 2007, <http://en.rian.ru/world/20070312/61864255.html>.
10. **Putin makes GLONASS navigation system free for customers**, *RIA Novosti*, 18 May 2007, <http://en.rian.ru/science/20070518/65725503.html>, 20 August, 2007.
11. **Russia allocates \$380 million for GLONASS in 2007**, *RIA Novosti*, 26 March 2007, <http://en.rian.ru/russia/20070326/62619883.html>, 20 August, 2007.
12. **Sarkar, S.**, Studies on evolution of the satellite based navigation techniques towards a complete GNSS, *Doctoral Dissertation*, Burdwan: University of Burdwan, 2016.
13. **Russia, India sign agreements on GLONASS navigation system**, *RIA Novosti*, 25 January, 2007, 20 August, 2007, <http://en.rian.ru/russia/20070125/59679099.html>.
14. **Russian GLONASS plans to compete against (or with) U.S. GPS by 2009**, William Atkins, April 24, 2007, <http://www.itwire.com.au/content/view/11187/1066/>.
15. **Roscosmos turned on 2 reserve GLONASS-M satellites**, *RIA Novosti*, 29.05.15, <http://sputniknews.com/russia/20101207/161671544.html>.
16. **Russia to lift GLONASS restrictions for accurate civilian use-1**, *Sputniknews.com/Russia*, 13.11.2006.
17. www.makeinindia.com/article/-/v/70-years-of-india-russia-space-exploration, accessed 31.12.17.
18. www.defencenews.in/article/Indo-Russian-Space-Collaboration, accessed 02.01.18.
19. United States – Russian Federation GPS/GLONASS Interoperability and Compatibility Working Group (WG-1), <http://www.glonass-iac.ru>, accessed 20.11.17.
20. **Bose, A., Sarkar, S., Hazra, K., Banerjee, P. and Reddy, G. S.**, A preliminary report on the usefulness of revitalized GLONASS in India, *Proc. Pearl Jubilee International Conference on “Navigation and Communication” (NAVCOM-2012)*, Hyderabad, India, 20-21 December, 2012, pp. 150–153.
21. https://en.wikipedia.org/wiki/List_of_GLONASS_satellites, accessed 28.11.17.
22. GNSS Activity Group, <http://bugnss.webs.com>.
23. **Langley, R. B.**, GLONASS: review and update, *GPS World*, 1997, vol. 8, no. 7, pp. 47–51.
24. **Cook, G. L.**, GLONASS performance, 1995–1997, and GPS- GLONASS interoperability issues, *Navigation, Journal of the Institute of Navigation*, 1997, vol. 44, no. 3, pp. 291–300.
25. **Mowafy, A. El.**, Integrated use of GPS and GLONASS in support of the redesign of road networks, *The Journal of Navigation*, Royal Institute of Navigation, 2001, vol. 54, no. 1, pp. 15–27.
26. **Polishchuk, G. M. and Revniviykh, S. G.**, Status and development of GLONASS, *Acta Astronautica*, 2004, vol. 54, pp. 949–955.
27. **Eissfeller, B., Ameres, G., Kropp, V. and Sanroma, D.**, Performance of GPS, GLONASS and GALILEO, *Photogrammetrische Woche*, 2007, pp. 185–199.
28. **Gagoline, S., Angrisano, A., Pugliano, G., Robustelli, U. and Vultaggio, M.**, A Stochastic Sigma Model for GLONASS Satellite Pseudorange, Parthenope University of Naples, Italy, available online at <http://nornav.custompublish.com/getfile.php/1067055.753.rxuffvedw/Alt%2031.pdf>.
29. **Information-analytical Centre**, Federal Space Agency, Korolyov, Russia, <https://www.glonass-iac.ru/en/>, accessed 02.02.2008.
30. **Kubo, N. and Kogure, S.**, Improvement of the GPS Performance in Urban Canyon Using QZSS, GNSS Workshop, Bangkok, Thailand, available online at www.denshi.e.kaiyodai.ac.jp/jp/assets/files/pdf/content/201001.pdf, accessed 03.05.20.
31. **Ji, S., Chen, W., Ding, X. and Chen, Y.**, Potential benefits of GPS/ GLONASS/GALILEO integration in an urban canyon Hong Kong, *The Journal of Navigation*, 2010, vol. 63, pp. 681–693.
32. **Banerjee, P.**, Studies on the Potentiality of GLONASS for Positioning and Timing vis-à-vis Application of GPS, Technical Report, New Delhi: National Physical Laboratory, 2001.
33. **Misra, P., Bruke, B. P. and Prait, M. A.**, GPS performance in navigation, *Special Issue on Global Positioning System, Proc. IEEE*, 1999, vol. 87, no. 1, pp. 65–85.
34. **Beser, J. and Balendra, A.**, Integrated GPS/ GLONASS navigation results, *Proc. ION GPS 1993*, Salt Lake City, UT, USA, 1993.
35. **Daly, P. and Misra, P.**, GPS and Global Navigation Satellite System (GLONASS), *Global Positioning System: Theory and Applications*, 1996, vol. 2, pp. 243–272.
36. **Leick, A., Beser, J., Rosenboom, P. and Wiley, B.**, Accessing GLONASS observation, *Proc. ION GPS 1998*, Nashville, TN, USA, September 1998, pp. 1605–1612.
37. **Roßbach, U.**, Positioning and navigation using the Russian Satellite System GLONASS, *PhD dissertation*, Munich: FAF Munich University, 2001.
38. **Cai, C. and Gao, Y.**, Precise point positioning using combined GPS and GLONASS observations, *Journal of Global Positioning System*, 2007, vol. 6, no. 1, pp. 13–22.

39. **Januszewski, J.**, Visibility and geometry of combined constellations GPS and Galileo, *Proc. of Institute of Navigation National Technical Meeting (ION NTM)*, 2007, pp. 252–262.
40. **Bose, A., Sarkar, S., Hajra, K., Banerjee, P., Nandi, S., Mukherjee, A., Reddy, G. S. and Kumar, M.**, Preliminary results of India-wide availability of GLONASS, *Proc. 8th International Conference on Microwaves, Antenna, Propagation & Remote Sensing ICMARS-2012*, Jodhpur, India, 2012, pp. 197–203.
41. **Bose, A., Reddy, G. S., Sarkar, S., Hazra, K., Dutta, D. and Kumar, M.**, Multi-GNSS experience from INDIA using GLONASS, GALILEO and GPS, *6th Asia Oceania Regional Workshop on GNSS*, Phuket, Thailand, 2014, pp. 21–22.
42. **Dhital, A., Bancroft, J. B. and Lachapelle, G.**, A new approach for improving reliability of personal navigation devices under harsh GNSS signal conditions, *Sensors*, 2013, vol. 13, no. 11, pp. 15221–15241.
43. **O'Driscoll, C., Lachapelle, G. and Tamazin, M.**, Dynamic duo: combined GPS/GLONASS receivers in urban environments, *GPS World*, 2011, vol. 22, no. 1, pp. 51–58.
44. **Ta, T. H., Truong, D. M., Nguyen, T. T., Hieu, T. T., Nguyen, T. D. and Belforte, G.**, Multi-GNSS positioning campaign in South-East Asia, *Coordinates*, 2013, vol. 9, no. 11, pp. 11–20.
45. **Sarkar, S. and Bose, A.**, Studies on solution accuracy of GLONASS from India, *Gyroscopy and Navigation*, 2016, vol. 7, no 1, pp. 39–49.
46. **Montenbruck, O., Steigenberger, P. and Hauschild, A.**, Broadcast versus precise ephemerides: a multi-GNSS perspective, *GPS Solutions*, 2015, vol. 19, pp. 321–333.
47. **Gunning, K., Walter, T. and Enge, P.**, Characterization of GLONASS broadcast clock and ephemeris: nominal performance and fault trends for ARAIM, *Proc. of the 2017 International Technical Meeting of The Institute of Navigation*, Monterey, California, 2017, pp. 170–183.
48. **Revnivykh S., Bolkunov A., Serdyukov A. and Montenbruck O.**, GLONASS. In: Teunissen, P.J. and Montenbruck, O., eds., *Springer Handbook of Global Navigation Satellite Systems*, Springer, Cham, 2017, pp. 219–245.
49. **Sarkar, S. and Bose, A.**, Lifetime performances of modernized GLONASS satellites: a review, *Artificial Satellites*, 2017, vol. 52, no. 4, pp. 85–97.
50. **Multi-GNSS Demonstration Campaign**, <http://www.multignss.asia/campaign.html>, accessed 15.12.15.
51. **Bose, A., Hazra, K. and Sarkar, S.**, A study on satellite geometry variation for multi-GNSS from India, *International Journal of Engineering Research*, 2014, vol 3, no. 10, pp. 575–579.
52. **Bose, A.**, Studies on the accuracy of timing via satellites and positioning via GPS, *Doctoral dissertation*, Burdwan: University of Burdwan, 2002.
53. **Bose, A., Reddy, G. S., Kumar, M., Banerjee, P., Sarkar, S., Hazra, K. and Das, S.**, Study on GPS-GLONASS interoperability in India, *National Conference on Application and Challenges in Space Based Navigation, ISRO Satellite Centre (ISAC)*, Bangaluru, India, 2013.
54. **GNSS Market Report**, Issue 5, European Global Navigation, Satellite Agency (GSA), 2017, available online https://www.gsa.europa.eu/system/files/reports/gnss_mr_2017.pdf.
55. <http://gpsworld.com/GLONASS-failure-inconsequential-to-users-says-russian-press/>, accessed 15.12.17.
56. <http://gpsworld.com/GLONASS-gone-then-back/>, accessed 27.12.17.
57. <http://gpsworld.com/GLONASS-loses-control-again/>, accessed 02.01.18.
58. **Santra, A., Mahato, S., Mandal, S., Dan, S., Verma, P., Banerjee, P. and Bose, A.**, Augmentation of GNSS utility by IRNSS/ NavIC constellation over the Indian region, *Advances in Space Research*, 2018, <https://doi.org/10.1016/j.asr.2018.04.020>.
59. **Bose, A., Reddy, G. S., Sarkar, S., Dutta, D. and Kumar, M.**, GLONASS from India: experience, potential and issues, *Breakout session: International cooperation in the field of introduction of GLONASS and other satellite navigation systems, The 3rd International Forum of Technological Development, Technoprom 2015*, Novosibirsk, Russian Federation, 2015.

Sarkar, S., Banerjee, P., and Bose, A. (Department of Physics, The University of Burdwan, India) A Review of 36 Years of GLONASS Service from India, *Giroskopiya i Navigatsiya*, 2018, vol. 26, no. 3 (103), pp. 92–109.

Abstract. Since its initial operation in 1982, GLONASS has completed 35 years of service and has passed through eventful journey. Being the first global alternative to GPS, it

generated interest among users worldwide. After initiation, the system declined to a period of unstable constellation status; the system has been revitalized and modernized since the end of 2012. This paper presents a concise discussion on initiation, development, decline and revitalization phases of the system and a review on the available research reports which presented the development and advantages of GLONASS as a stand-alone system and as a multi-GNSS component. The paper reviews the experiences of using the advantages of GLONASS from India during its complete service period based on real-time, long-term systematic analysis over the Indian region both for the initial and the revitalized and modernized phases. Finally, considering the long-term experience of using GLONASS, the paper presents a few issues towards popularization and quality enhancement of GLONASS services from India. This review may be useful in understanding the need, advantages and challenges of using GLONASS from the region.

Key words: GLONASS, Modernization, Multi-GNSS.

Материал поступил 18.05.2018