УДК 528.1
DOI:10.30533/GiA-2026-024

CC BY

Разработка методики и технологии автоматизированного периодического уравнивания сети постоянно действующих спутниковых геодезических станций

А.О. Куприянов[1] ✉, **А.С. Коробова**[1], **Д.А. Морозов**[1], **Д. Замогильный**[1]

[1] Московский государственный университет геодезии и картографии, Москва, Россия
✉ gnss@miigaik.ru

цитирование Куприянов А.О., Коробова А.С., Морозов Д.А., Замогильный Д. Разработка методики и технологии автоматизированного периодического уравнивания сети постоянно действующих спутниковых геодезических станций // Известия вузов «Геодезия и аэрофотосъемка». 2026. Т. 70, № 3. С. 23–41. DOI:10.30533/GiA-2026-024.

ключевые слова уравнивание спутниковых геодезических сетей, периодическое уравнивание, технология автоматизации уравнивания, обработка наблюдений глобальной навигационной спутниковой системы, сеть дифференциальных геодезических станций, скорость движения станций

аннотация

Для определения скоростей движения пунктов и мониторинга целостности спутниковой геодезической сети необходимо периодически выполнять ее уравнивание. Данное исследование направлено на разработку методики и технологии автоматизированного периодического уравнивания сети дифференциальных геодезических станций (СДГС). Предлагаемые методика и технология основываются на использовании программного обеспечения (ПО) Bernese GNSS Software, инструмента Bernese Processing Engine и специально разработанного ПО на языке программирования Python. Данная технология позволяет производить автоматизированное уравнивание спутниковых сетей со скачиванием всех необходимых данных и последующей публикацией файлов результатов в формате SINEX на FTP-сервер. С ее помощью произведена апробация методики периодического уравнивания фрагмента сети Международной ГНСС-службы из 12 пунктов на период, составляющий 365 суток (с 1 января по 31 декабря 2023 года). Вычислены скорости пунктов совместно с их средними квадратическими погрешностями в топоцентрической горизонтной системе координат (ENU), и произведен анализ смещений станций сети по полученным уравненным координатам относительно первой эпохи. Методика может найти применение в геодинамических исследованиях, контроле целостности и выявлении смещений пунктов СДГС, вычислении скорости движений пунктов СДГС.

1 Введение

В настоящее время во многих регионах мира созданы постоянно действующие сети наблюдения глобальных навигационных спутниковых систем (ГНСС) для различных целей: создания высокоточных геодезических сетей, мониторинга геодинамических процессов и установления системы отсчета. Данные сети классифицируются по размеру[1] (глобальные, научно-исследовательские, федеральные, региональные и частные). Глобальные сети создаются в первую очередь для научных исследований, требующих международного сотрудничества, тогда как сети для прикладных задач находятся на территории одного государства. Глобальные сети, такие как сети Международной ГНСС-службы (*англ.* International GNSS Service, IGS[2]), поддерживают международную систему отсчета ITRF (*англ.* International Terrestrial Reference Frame), а сеть некоммерческого университетского консорциума UNAVCO (*англ.* University NAVSTAR Consortium) используется для геодинамических исследований, включая изучение деформаций земной коры, вулканической активности и изменения уровня моря[3,4]. Федеральные сети, в частности фундаментальная астрономо-геодезическая сеть (ФАГС) [1, 2], обеспечивают государственную систему отсчета. Региональные сети, такие как федеральная сеть геодезических станций (ФСГС), и частные сети (HIVE, PrinNet, «ГЕОСПАЙДЕР», SmartNet, UGTNET, RTKNet, Topnet Live и др.[5,6] [3, 4]) функционируют в качестве сетей дифференциальных геодезических станций (СДГС).

Ежедневный объем наблюдений ГНСС, собираемый такими сетями, требует высокоавтоматизированной обработки для осуществления контроля целостности сети, выявления смещения пунктов СДГС и получения актуальных координат станций на текущую эпоху в виде файла SINEX (*англ.* Solution INdependent EXchange Format) [5–7]. Для реализации автоматизированного ежесуточного уравнивания спутниковой геодезической сети (СГС) за длительные периоды необходима унифицированная технология, обеспечивающая полную цикличность процессов: от автоматизированного получения исходных данных до выгрузки полученных результатов, а также учет дополнительных корректирующих файлов для повышения точности. Существующие решения обычно создаются индивидуально для конкретных сетей, задач или центров обработки данных ГНСС. Такие системы часто включают локально разработанные программные компоненты, которые недоступны для широкого использования или приобретения. Поскольку без владения такой технологией затруднительно проводить исследования в области геодинамики, установления системы отсчета, контроля целостности сети, требуется разработать собственное программное обеспечение (ПО).

Научная актуальность настоящей работы заключается в разработке обобщенной методики и программно-технологического решения, позволяющего интегрировать существующее ПО (Bernese GNSS Software[7] [далее Bernese], GAMIT/GLOBK, RTKLib и др.) в полностью автоматизированный цикл периодического уравнивания СДГС. Такой подход обеспечивает не только техническую

1 ГОСТ Р 55024-2012. Сети геодезические. Классификация. Общие технические требования. М.: Стандартинформ, 2014. 7 с.

2 International GNSS Service. [Электронный ресурс]. Режим доступа: https://igs.org (дата обращения: 28.04.2025).

3 GPS and Earthquakes. [Электронный ресурс]. Режим доступа: https://www.earthscope.org/what-is/gps/gps-and-earthquakes/ (дата обращения: 28.04.2025).

4 Hazards & Applications. [Электронный ресурс]. Режим доступа: https://www.earthscope.org/what-is/hazards-applications/ (дата обращения: 28.04.2025).

5 Юламанова И.И. Создание сети постоянно действующих спутниковых станций // Международный журнал гуманитарных и естественных наук. 2016. № 3. С. 5–7.

6 Шаймарданова Р.Р. Создание сети постоянно действующих спутниковых референцных станций // Международный журнал гуманитарных и естественных наук. 2017. № 5. С. 19–21.

7 Bernese GNSS Software. [Электронный ресурс]. Режим доступа: https://www.bernese.unibe.ch (дата обращения: 28.04.2025).

автоматизацию, но и стандартизацию процесса обработки, что повышает надежность, воспроизводимость и оперативность результатов.

Целью данной научно-исследовательской работы является разработка такой методики и технологии автоматизированного периодического уравнивания сети постоянно действующих спутниковых геодезических станций, которая обеспечивает:

- снижение трудозатрат и исключение человеческого фактора при обработке больших массивов ГНСС-данных;
- повышение оперативности предоставления координат и скоростей станций на актуальную эпоху;
- воспроизводимость и стандартизацию процесса уравнивания для целей геодинамического мониторинга, контроля целостности СДГС и поддержания систем отсчета.

В разработке такой технологии ключевым этапом является выбор основного программного компонента, который будет непосредственно выполнять обработку ГНСС-наблюдений. В настоящее время для проведения автоматизированной обработки данных ГНСС применяются такие программные средства, как Bernese, GAMIT/GLOBK [8–13]. Они поддерживают неинтерактивный режим работы (скриптовую автоматизацию), что позволяет выполнять ежесуточную обработку данных за длительные периоды без участия оператора. Эти программы отличаются гибкой архитектурой, предоставляют доступ к исходному коду, обеспечивают высокую точность обработки наблюдений ГНСС за счет использования дополнительных файлов корректирующих моделей (ионосферных и тропосферных задержек, океанических приливов и приливов твердой Земли и т. д.), необходимых для научных задач.

Для реализации разрабатываемой технологии в качестве основного компонента выбрано программное обеспечение Bernese, т. к. его модуль BPE (*англ.* Bernese Processing Engine) обеспечивает большую гибкость настройки автоматизированных рабочих процессов обработки наблюдений ГНСС.

Разработана методика по применению модуля BPE ПО Bernese для выполнения регулярного автоматизированного уравнивания спутниковых геодезических сетей. Для ее практической реализации создана специальная технология — программа на языке Python, обеспечивающая автоматическое скачивание необходимых данных, выполнение обработки и выгрузку результатов на FTP-сервер. Технология позволяет производить уравнивание для большого количества суток подряд в заданном интервале или уравнивать каждые новые сутки по факту появления необходимых для этого данных.

2 Материалы и методы

Разработанная технология использует для обработки наблюдений ГНСС модуль BPE, который позволяет осуществлять обработку данных ГНСС в соответствии с выбранными / составленными скриптами. Скрипты BPE представляют собой программные модули на Perl, предназначенные для автоматизации и управления процессами обработки данных ГНСС. BPE имеет возможность запускаться в двух режимах: интерактивном и неинтерактивном. В неинтерактивном режиме модуль BPE запускается в виде консольного приложения. BPE также способен выполнять более одной задачи одновременно на различных (локальных, удаленных) центральных процессорах (*англ.* Central Processing Unit) и даже может распределять одну задачу между ними. Перед началом работы с BPE необходимо разместить все используемые программой файлы для обработки по соответствующим директориям и обновить ряд общих файлов, включающий в себя файлы спутниковой информации, определения геодезических систем отсчета, файлы с константами, используемыми Bernese.

Для уравнивания спутниковой геодезической сети в Bernese требуется набор дополнительных файлов, обеспечивающий получение высокоточного

результата. Файлы для обработки разделяются по периодичности обновления: одни требуют регулярной актуализации с FTP-сервера разработчиков Bernese, другие создаются единожды для конкретной сети. Однако есть файлы, которые необходимо скачивать ежедневно — перед обработкой данных на каждые сутки. Поскольку целью работы является создание методики и технологии автоматизированного периодического уравнивания сети постоянно действующих спутниковых геодезических станций, то даже на уровне сбора исходной измерительной информации требуется автоматизировать скачивание необходимых файлов.

Файлы наблюдений в форматах RINEX V2 и RINEX V3 скачиваются на каждые обрабатываемые сутки с сервера обрабатываемой сети или локального диска с предварительно загруженными туда данными. Эти файлы могут быть сжаты в архив и дополнительно сжаты путем конвертации в формат Compact RINEX по схеме Hatanaka. Разработанная технология предусматривает такие виды разархивирования и конвертации.

Дополнительные файлы ассистирующей информации скачиваются с FTP- или HTTP-сервера одного из аналитических центров, занимающихся их формированием: IGS, Центра определения орбит в Европе (*англ.* Center for Orbit Determination in Europe, CODE), Информационно-аналитического центра координатно-временного и навигационного обеспечения, Японского агентства аэрокосмических исследований (*англ.* Japan Aerospace Exploration Agency, JAXA), Квазизенитной спутниковой системы (*англ.* Quasi-Zenith Satellite System Services, QSS), Центра орбитальных и наземных данных (*англ.* Scripps Orbit and Permanent Array Center, SOPAC), Национального географического института Франции (*франц.* Institut Geographique National, IGN). Такими данными являются файлы: глобальной ионосферной карты; межканальных задержек; точных эфемерид и поправок часов; параметров вращения Земли.

Для работы BPE необходим ряд файлов, отвечающих за систему инфраструктуры ГНСС. Они должны обновляться по мере выхода новых версий, поставляемых разработчиками Bernese на FTP-сервере[8], и располагаться во внутренней директории GEN. Это файлы:

- I20.ATX (модель калибровки антенн);
- SAT_YYYY.CRX (возникающие проблемы спутников — изменение траектории, неправильные интервалы наблюдений);
- SATELLITT.I20 (спутниковая информация);
- PCV_COD.I20 (информация о фазовом центре спутниковой антенны и антенны приемника, изменении эксцентриситетов);
- CONST (константы, используемые в программе);
- DATUM (определение геодезических систем отсчета);
- GPSUTC (високосные секунды);
- RECEIVER (характеристики приемника);
- IAU2000R06.NUT (модель нутации);
- IERS2010XY.SUB (модель полюса);
- EGM2008_SMALL (коэффициенты геопотенциала Земли);
- OT_FES2004.TID (коэффициенты модели океанических приливов);
- TIDE2000.TPO (приливы твердой Земли);
- s1_s2_def_ce.dat (сетка с поправками на атмосферную приливную нагрузку).

Для работы BPE также необходимо сформировать (один раз на всю обрабатываемую сеть) следующие файлы в формате Bernese[9] с информацией об обрабатываемой сети:

- {V_REFINF}_R.CRD (априорные координаты с указанием системы отсчета и эпохи) — на основе априорной информации о координатах станций, полученной из внешних источников;

8 Bernese GNSS Software. [Электронный ресурс]. Режим доступа: http://ftp.aiub.unibe.ch/BSWUSER52/ (дата обращения: 28.04.2025).

9 Bernese GNSS Software Version 5.2. [Электронный ресурс]. Режим доступа: https://www.bernese.unibe.ch/docs/DOCU52.pdf (дата обращения: 28.04.2025).

- {V_REFINF}_R.VEL (скорости априорных координат станций с указанием системы отсчета) — на основе полученных из внешних источников данных об априорных скоростях движения станций;
- {V_CRDINF}.CRD (координаты с указанием системы отсчета и эпохи) — на основе файлов наблюдений;
- {V_CRDINF}.VEL (скорости с указанием системы отсчета) — если в априорном файле нет скоростей определяемых станций;
- {V_CRDINF}.ABB (аббревиатуры) — на основе списка станций (создается пользователем или автоматически);
- {V_CRDINF}.STA (информация о станциях) — на основе метаданных станций;
- {V_CRDINF}.CLU (сокращения заголовков RINEX и кластеры: разбивка обработки станций на группы, нумерация 0–99) — для организации обработки (создается пользователем или автоматически);
- {V_ATLINF}.ATL (поправки за атмосферу) — на основе модели атмосферных поправок (может быть создан автоматически или импортирован из внешних источников).

Все вышеуказанные файлы создаются через внутренние сервисы Bernese.

Посредством использования внешних сервисов необходимо создать следующие файлы:

- {V_BLQINF}.BLQ (океанические нагрузки) — с помощью сервиса Ocean Tide Loading[10,11] путем отправления запроса с наименованием станций и их приближенными геодезическими или прямоугольными координатами, которых нет в файле FES2004.BLQ с информацией по станциям сети IGS на FTP-сервере, поставляемом разработчиками Bernese;
- DE405.EPH (планетарные и лунные эфемериды) — посредством подпрограммы Bernese и командной строки из составляющих файлов с FTP-сервера планетарных и лунных эфемерид сайта Лаборатории реактивного движения Калифорнийского технологического института[12] (формируется на 20 лет и размещается в директории GEN, обеспечивает высокоточные данные о положении планет и Луны для расчета гравитационных возмущений, релятивистских поправок).

Для обработки нужно составить скрипт, получить и разместить в правильных местах следующие файлы: основные (ежедневные файлы наблюдений RINEX, конвертируемые в RINEX V2), дополнительные (ассистирующая информация из аналитических центров) и сервисные (регулярно обновляемые файлы инфраструктуры ГНСС и обрабатываемой сети — координаты, скорости, метаданные).

Разрабатываемая методика должна удовлетворять следующим требованиям:

- обеспечивать полную автоматизацию всех этапов обработки без участия оператора;
- поддерживать обработку длительных временных рядов (поскольку в сети IGS существуют станции с непрерывными наблюдениями, охватывающими период до 30 лет, — это максимальная продолжительность непрерывных данных, доступная на сегодняшний день);
- гарантировать воспроизводимость результатов при повторном запуске;
- обеспечивать соответствие точности обработки требованиям геодинамических исследований, необходимых для надежного выявления малых, но физически значимых деформаций земной коры, таких как тектонические смещения, постсейсмические деформации или оседания, вызванные антропогенными факторами (согласно техническому отчету IGS[13],

10 Ocean Tide Loading. [Электронный ресурс]. Режим доступа: http://holt.oso.chalmers.se/loading/ (дата обращения: 28.04.2025).

11 Ocean Tide Loading Provider. [Электронный ресурс]. Режим доступа: https://teromovigo.com/product/ocean-tide-loading-provider/ (дата обращения: 28.04.2025).

12 Public FTP File Browser / Jet Propulsion Laboratory California Institute of Technology. [Электронный ресурс]. Режим доступа: https://ssd.jpl.nasa.gov/ftp/eph/planets/ascii/de405/ (дата обращения: 28.04.2025).

13 International GNSS Service Technical Report 2020. [Электронный ресурс]. Режим доступа: https://files.igs.org/pub/resource/technical_reports/2020_techreport.pdf (дата обращения: 03.06.2025).

для точного обнаружения таких эффектов на фоне шумов измерений и атмосферных возмущений необходимо, чтобы средняя квадратическая погрешность [СКП] координатного определения не превышала 10 мм в плане и 20 мм по высоте).

Эффективность технологии оценивалась по следующим критериям:

- времени обработки одного дня по сравнению с интерактивным режимом;
- степени соответствия вычисленных скоростей станций априорным данным ITRF2020[14];
- устойчивости к сбоям при загрузке данных и возможности автоматического восстановления обработки;
- полученной точности — СКП координат станций СДГС.

3 Результаты и обсуждение

3.1 Методика

Для реализации автоматизированного уравнивания спутниковых сетей была разработана методика, основанная на использовании модуля BPE Bernese (рис. 1). Первые три этапа методики являются подготовительными, а последующие пять — основными.

На предварительном этапе определяется состав станций обрабатываемой сети, фиксируется временной интервал, за который будут собираться данные. Устанавливаются также источники, из которых будут загружаться основные и дополнительные файлы для обработки.

На первом этапе требуется установить необходимые программные компоненты для корректной работы автоматизированного запуска BPE Bernese на операционной системе Microsoft Windows, компилятор Perl 5.10.0.6, который нужен для выполнения скриптов автоматизации, управления обработкой данных и интеграции вспомогательных модулей. В директории %C%\GPS\EXE следует разместить программу CRX2RNX.EXE для распаковки Compact RINEX по схеме Хатанака. Путь к данным программам необходимо прописать переменной окружения Microsoft Windows Path, представляющей собой набор каталогов, в которых расположены исполняемые файлы.

На втором этапе для файлов результатов в директории %S%\RNX2SNX (область SAVEDISK) надо создать папку с наименованием обрабатываемого года из четырех символов, в которой размещают папки ATM, OUT, SOL, STA. Это делается для того, чтобы после выполнения обработки программа могла сохранить полученные результаты.

На третьем этапе необходимо подготовить файл, который будет запускать BPE в режиме автоматизированного запуска. Для этого надо открыть Bernese, выбрать требуемую сессию (день обработки) и запустить модуль BPE. Далее BPE настраивают под необходимые параметры, выбирают исполняющий файл PCF — файл управления процессом, определяющий, какие сценарии должны запускаться и в каком порядке выполняться. Для периодического уравнивания подходит файл RNX2SNX.PCF, который производит стандартную обработку по двойным разностям региональных сетей для вычисления координат и параметров тропосферы всех включенных станций в заданной системе отсчета. После заполнения всех необходимых параметров вместо интерактивного запуска BPE параметры BPE надо сохранить в файле с именем по умолчанию RUNBPE.INP (INP — стандартный формат программы) в директории %U%/PAN. Данный файл позволяет произвести запуск модуля BPE в неинтерактивном режиме.

14 ITRF2020. [Электронный ресурс]. Режим доступа: https://itrf.ign.fr/en/solutions/ITRF2020 (дата обращения: 28.04.2025).

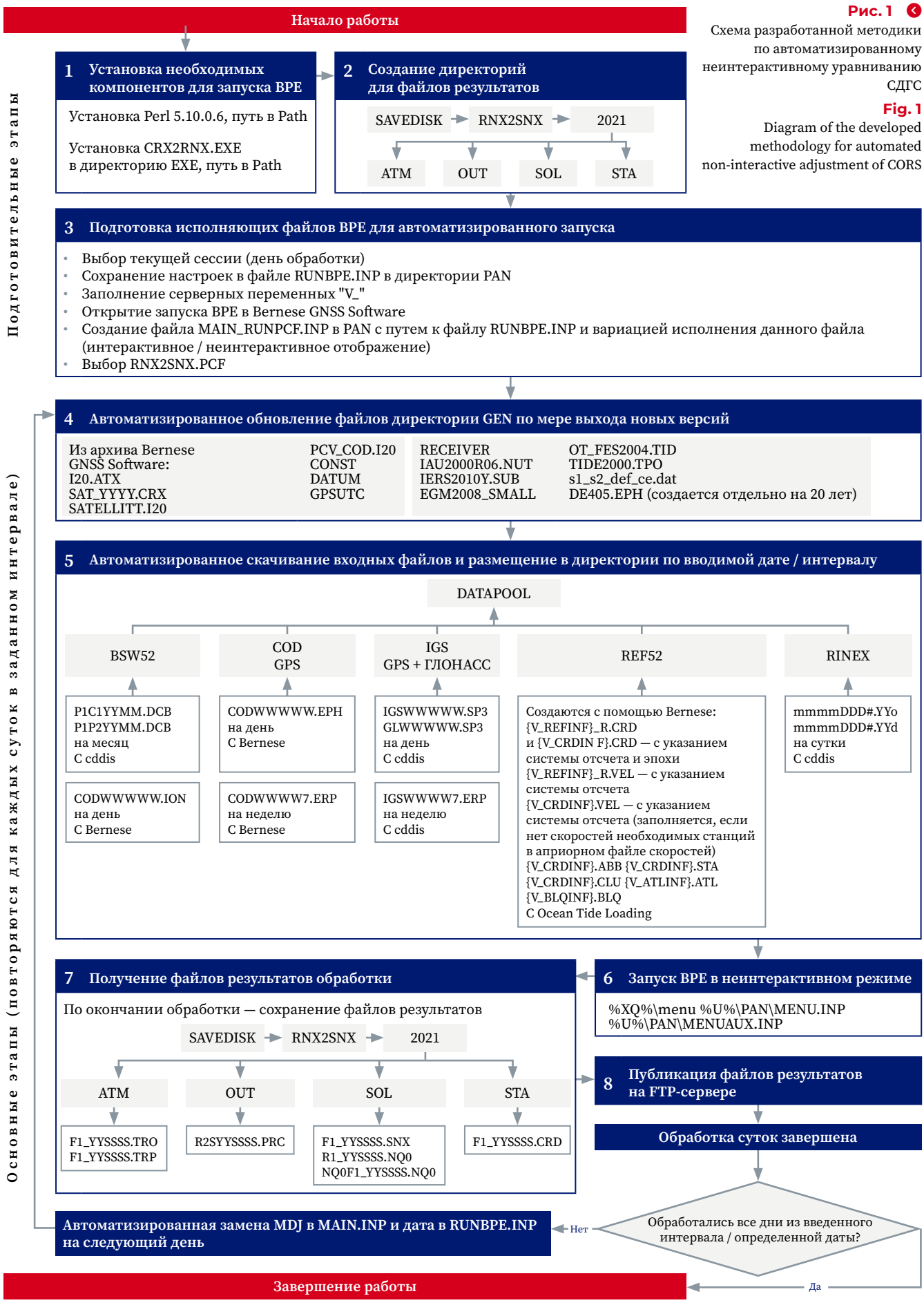


Рис. 1
Схема разработанной методики по автоматизированному неинтерактивному уравниванию СДГС

Fig. 1
Diagram of the developed methodology for automated non-interactive adjustment of CORS

Рис. 2
Схема программной реализации автоматизированного уравнивания

Fig. 2
Scheme of the software implementation for automated network adjustment



На четвертом этапе следует обновить файлы директории GEN по мере выхода новых версий, отвечающих за систему инфраструктуры ГНСС, поставляемые разработчиками Bernese на своем FTP-сервере.

На пятом этапе требуется скачать входные файлы (с ассистирующей информацией, наблюдений, в формате Bernese с информацией об обрабатываемой сети) и распределить их по соответствующим директориям.

Когда все необходимые файлы подготовлены, выполняют запуск BPE в неинтерактивном режиме с помощью раннее созданного файла RUNBPE.INP и производят неинтерактивное уравнивание спутниковой сети по скриптам. По завершении обработки результаты сохраняют в ранее созданных директориях области %S% (SAVEDISK). Полученные файлы результатов, а именно SINEX-файлы, публикуют на FTP-сервере.

После того как обработка на заданные сутки будет завершена, необходимо заменить модифицированную юлианскую дату (*англ.* Modified Julian Date, MDJ) на MDJ следующего обрабатываемого дня. Меняют также дату в файле с сохраненными, выбранными серверными переменными RUNBPE.INP. Затем переходят к обработке следующих суток.

3.2 Технология

Данная методика реализована в форме ПО autoBPE.exe, разработанного на языке программирования Python. ПО выполняет полный цикл обработки данных: принимает параметры из консоли, считывает список станций из stationlist.txt, автоматически скачивает и конвертирует RINEX-файлы, загружает дополнительные данные, запускает модуль Bernese BPE для уравнивания сети, сохраняет результаты в формате SINEX и выгружает их на FTP-сервер. При этом программа проверяет завершение обработки всех дней из заданного интервала, автоматически обновляя даты в файлах конфигурации (MAIN.INP, RUNBPE.INP) для последующих итераций. Схема работы программы autoBPE.exe приведена на рис. 2.

Работа программы autoBPE.exe начинается с ее запуска через командную строку с указанием параметров — даты или временного интервала обработки. На первом этапе программа считывает список станций из файла stationlist.txt, который определяет, для каких наименований станций необходимо загрузить данные.

Далее следует загрузка файлов RINEX. Если на серверах доступны только файлы формата RINEX V3, они автоматически конвертируются в стандартный RINEX V2 с помощью инструмента gfzrnx.exe. Для файлов, сжатых в формате Hatanaka (CRX), используется ПО CRX2RNX.exe, которое декомпрессирует их в обычный формат RINEX. Все загружаемые файлы переименовываются в соответствии с установленными правилами, что обеспечивает единообразие структуры данных.

Процесс скачивания файлов включает строгую фильтрацию: загружаются только те данные, которые соответствуют названиям станций из stationlist.txt и заданному временному периоду. Перед загрузкой программа проверяет директорию на наличие аналогичного файла, и, если такой уже существует, повторное скачивание пропускается. Распакованные архивы автоматически перемещаются в заранее определенные каталоги для дальнейшей обработки.

После подготовки данных программа запускает модуль BPE, который выполняет обработку на основе загруженных файлов. Результаты обработки сохраняются в директорию SAVEDISK в формате SINEX. Если заданный период включает несколько дней, autoBPE.exe обновляет параметры в файлах MAIN.INP и RUNBPE.INP (меняет дату на следующий день) и повторяет цикл до тех пор, пока все дни не будут обработаны.

Программа также постоянно отслеживает FTP-серверы на предмет появления новых файлов, необходимых для обработки. При обнаружении недостающих данных autoBPE.exe автоматически загружает, преобразует и распределяет их. Вся логика работы реализована в виде полностью автоматизированного

процесса, который охватывает этапы от сбора данных до выгрузки результатов, обеспечивая надежность и эффективность обработки.

3.3 Апробация

Для проверки разработанной технологии было решено провести опытную эксплуатацию. Основной целью является наблюдение за функционированием технологии при уравнивании длительных периодов, а также выявление и устранение возможных проблем. Для этого была сформирована локальная сеть путем выделения 12 пунктов IGS на период с 01.01.2023 по 31.12.2023 (365 суток) и выполнено ее уравнивание. Выбор сети IGS продиктован тем, что файлы ГНСС-наблюдений со станций расположены в общем доступе и в большинстве случаев имеются в наличии на каждый день на сервере информационной системы данных о динамике земной коры (*англ.* Crustal Dynamics Data Information System, CDDIS[15]) НАСА. Bernese разрабатывался как специализированный инструмент для высокоточной обработки ГНСС-наблюдений, включая данные сети IGS. Поэтому в отношении сети IGS уже сформированы все необходимые для обработки дополнительные файлы.

Выбранные станции близко расположены друг к другу (среднее расстояние между ближайшими станциями составляет 20 км), что позволяет сформировать из них локальную сеть для детального мониторинга геодинамических процессов. Кроме того, Калифорния представляет особый интерес для геодезических исследований из-за высокой сейсмической и тектонической активности, связанной с взаимодействием Тихоокеанской и Северо-Американской плит. Это делает данный регион подходящим для опытной эксплуатации разработанной технологии в условиях геодинамических процессов [14, 15]. Схема используемой СГС представлена на рис. 3.

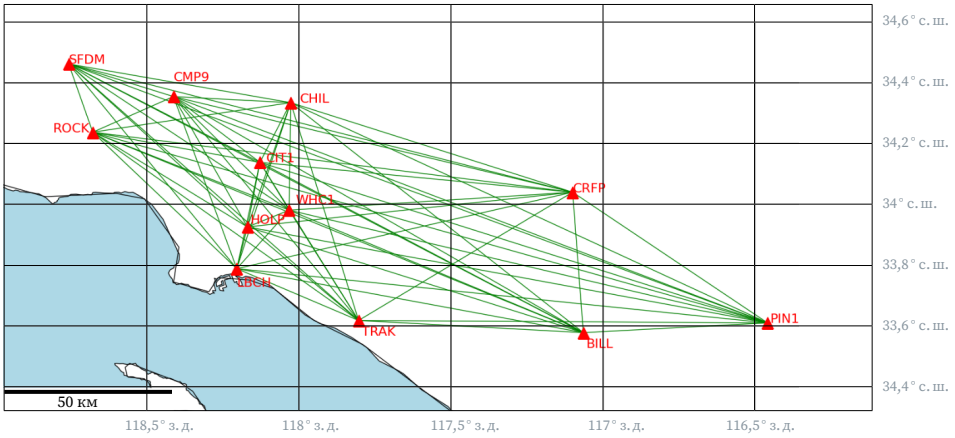


Рис. 3
Схема используемой СГС

Fig. 3
Scheme of the satellite geodetic network used

Обрабатывая 12 станций сети IGS, мы получаем 11 построенных базовых линий. Bernese обрабатывает независимые базовые линии ($n-1$, где n — количество обрабатываемых станций), формируя разности с наибольшим количеством общих измерений.

Уравнивание на весь заявленный период (365 суток) было успешно выполнено при помощи разработанной технологии. По результатам обработки на 365 суток были получены файлы нормальных уравнений NQ0, файл уравненных координат CRD и SINEX-файлы.

Автоматизированное уравнивание спутниковой геодезической сети на один день занимало около 15 минут. В то же время, если уравнивать вручную (включая самостоятельную загрузку всех необходимых файлов), временные затраты на данную процедуру возрастают в три раза. Автоматизированное уравнивание

15 CDDIS. [Электронный ресурс]. Режим доступа: https://www.earthdata.nasa.gov/centers/cddis-daac (дата обращения: 28.04.2025).

выбранных пунктов на период с 01.01.2023 по 31.12.2023 заняло около 6000 мин., или 5 дней беспрерывной работы разработанной программы на процессоре Intel Core i5-11400 с частотой оперативной памяти 3200 МГц. Стоит принять во внимание то, что иногда сервер BPE выходил из строя, что приводило к сбоям в обработке данных за определенный временной интервал. В таких ситуациях разработанная программа обеспечивала повторное выполнение уравнивания необработанных данных соответствующего дня.

Проверка возможности обработки длительных временных рядов (до 30 лет) была выполнена на примере станций WHC1, BILL и TRAK сети IGS, для которых доступны непрерывные RINEX-наблюдения с минимальными изменениями аппаратуры и стабильным положением антенн на протяжении всего периода. Обработка данных на весь доступный период времени подтвердила работоспособность разработанной методики и устойчивость результатов уравнивания.

Для проверки воспроизводимости результатов уравнивание одной и той же сети IGS из 12 станций за период с 01.01.2023 по 31.12.2023 было выполнено три раза подряд с полной перезагрузкой исходных данных и повторным проведением вычислений. Сравнение полученных координат и скоростей показало полное совпадение результатов, что подтверждает высокую степень воспроизводимости результатов при использовании разработанной методики и технологии.

3.4 Результаты апробации

В рамках опытной эксплуатации разработанной технологии выполнено автоматизированное периодическое уравнивание 12 станций сети IGS на 365 суток и получены SINEX-файлы с оцененными координатами данных станций на 365 суток. Составлены временные ряды приращений координат станций относительно первой эпохи, по которым вычислены плановые (m_{EN}) и высотные (m_U) СКП в горизонтной топоцентрической системе координат (E — восток, N — север, U — высота), приведенные в табл. 1.

Таблица 1
СКП в плане и по высоте

Table 1
RMS in plan and height

Станция	m_{EN}, мм	m_U, мм
BILL	7,435	2,104
CHIL	6,650	2,384
CIT1	10,203	3,321
CMP9	7,472	1,904
CRFP	9,687	2,183
HOLP	5,838	1,604
LBCH	6,000	1,589
PIN1	13,244	7,313
ROCK	9,621	9,758
SFDM	8,723	2,812
TRAK	6,360	1,777
WHC1	6,143	1,652

По имеющимся приращениям были оценены скорости движения и их СКП путем аппроксимации по методу наименьших квадратов, в частности по параметрическому методу. Для верификации полученных результатов использовались скорости станций и их СКП из кинематической модели положения станций ITRF, актуальных на 2023 год. Вычисленные и априорные скорости совместно с их СКП в горизонтной топоцентрической системе координат ENU приведены в табл. 2.

Таблица 2
Рассчитанные априорные скорости и СКП для рассматриваемых станций

Table 2
Estimated a priori velocities and RMS for the selected geodetic stations

Станция	Bernese, мм						ITRF2020, мм					
	V_E^{aBPE}	V_N^{aBPE}	V_U^{aBPE}	$m_{V_E^{aBPE}}$	$m_{V_N^{aBPE}}$	$m_{V_U^{aBPE}}$	V_E^{ITRF}	V_N^{ITRF}	V_U^{ITRF}	$m_{V_E^{ITRF}}$	$m_{V_N^{ITRF}}$	$m_{V_U^{ITRF}}$
BILL	−35,102	15,842	6,472	0,321	0,217	1,370	−35,583	14,849	−0,097	0,132	0,151	0,163
CHIL	−36,471	10,939	3,206	0,344	0,272	1,225	−34,743	12,844	1,688	3,085	3,450	3,750
CIT1	−35,189	14,881	7,881	0,446	0,419	1,880	−34,871	15,929	−0,669	3,156	3,711	3,918
CMP9	−33,446	14,210	−1,331	0,231	0,264	1,377	−36,252	14,761	−0,934	3,310	3,957	4,177
CRFP	−29,716	7,016	9,959	0,313	0,252	1,785	−28,617	8,687	1,120	0,325	0,372	0,404
HOLP	−39,053	15,915	13,386	0,208	0,210	1,074	−38,288	15,519	−4,511	0,273	0,313	0,335
LBCH	−36,204	14,545	−6,097	0,215	0,199	1,103	−39,366	18,684	0,545	0,096	0,104	0,111
PIN1	−25,539	9,314	12,765	1,175	0,659	2,439	−27,979	6,610	−0,930	3,305	3,928	4,293
ROCK	−38,328	20,469	10,561	1,659	0,694	1,772	−38,366	17,131	0,684	0,207	0,242	0,253
SFDM	−36,384	13,340	7,838	0,376	0,356	1,607	−36,753	13,990	2,367	3,112	3,400	3,780
TRAK	−38,387	16,660	−3,900	0,225	0,238	1,168	−37,916	18,786	−1,040	3,301	3,872	4,239
WHC1	−37,969	16,219	−3,730	0,229	0,201	1,129	−38,691	15,122	−2,082	0,226	0,260	0,278

Для оценки корректности полученных скоростей использовались разности между априорными и вычисленными скоростями. СКП такой разности, исходя из функции общего вида, выражают следующей формулой:

1

$$m_{dV_i} = \sqrt{\left(m_{V_i^{aBPE}}\right)^2 + \left(m_{V_i^{ITRF}}\right)^2},$$

где i — координата в горизонтной топоцентрической системе координат ENU.

Используя доверительный интервал для вероятности 99,73 %, можем рассчитать предельную допустимую погрешность разности как

2

$$F = \pm 3 \times m_{dV_E}.$$

Если полученная разность не превышает предельную погрешность, можно сделать вывод о том, что скорости и их СКП получены корректно. Результаты соответствующих вычислений приведены в табл. 3.

Таблица 3
Результаты сравнительного анализа рассчитанных и априорных скоростей

Table 3
Results of the comparative analysis of calculated velocities versus a priori velocities

Станция	Разность скоростей, мм			СКП разности, мм			Предельная погрешность, мм			$F - \lvert\Delta V\rvert$, мм		
	ΔV_E	ΔV_N	ΔV_U	m_{dV_E}	m_{dV_N}	m_{dV_U}	F_{dV_E}	F_{dV_N}	F_{dV_U}	ΔE	ΔN	ΔU
BILL	−0,481	−0,993	−6,569	0,347	0,264	1,380	1,041	0,793	4,139	0,561	−0,200	−2,429
CHIL	1,728	1,905	−1,519	3,104	3,460	3,945	9,311	10,381	11,836	7,584	8,476	10,317
CIT1	0,317	1,048	−8,549	3,187	3,734	4,346	9,561	11,203	13,037	9,244	10,155	4,487
CMP9	−2,806	0,551	0,397	3,318	3,966	4,398	9,955	11,898	13,194	7,149	11,348	12,797
CRFP	1,099	1,671	−8,839	0,451	0,449	1,830	1,353	1,347	5,491	0,254	−0,324	−3,349
HOLP	0,765	−0,396	−17,897	0,343	0,377	1,125	1,030	1,131	3,376	0,265	0,735	−14,521
LBCH	−3,162	4,140	6,641	0,235	0,225	1,108	0,706	0,674	3,325	−2,456	−3,466	−3,317
PIN1	−2,440	−2,704	−13,695	3,508	3,983	4,938	10,524	11,950	14,814	8,084	9,246	1,119
ROCK	−0,038	−3,339	−9,877	1,672	0,735	1,790	5,015	2,206	5,371	4,977	−1,133	−4,506
SFDM	−0,369	0,650	−5,471	3,135	3,418	4,108	9,404	10,255	12,323	9,035	9,605	6,851
TRAK	0,471	2,126	2,860	3,309	3,879	4,397	9,927	11,637	13,192	9,456	9,511	10,332
WHC1	−0,721	−1,097	1,648	0,321	0,329	1,163	0,964	0,986	3,488	0,243	−0,111	1,841

В большинстве случаев ΔV_E, ΔV_N, ΔV_U не выходят за пределы заданного доверительного интервала, что подтверждает высокую степень соответствия вычисленных скоростей станций априорным данным ITRF2020. Однако есть ряд исключений. Для ~40 % станций ΔV_U по высоте выходит за пределы доверительного интервала. Причиной этого может как небольшая продолжительность используемого интервала времени, так и различия в способе аппроксимации ряда приращения координат.

В ITRF (начиная с 2014 года) смещения станции аппроксимируются следующей функцией[16]:

3 $$X(t) = X(t_0) + \dot{X}(t - t_0) + \delta X_{PSD}(t) + \delta X_f(t),$$

где $X(t_0)$ — положение станции;
$\dot{X}(t - t_0)$ — скорость станции;
$\delta X_{PSD}(t)$ — поправка за постсейсмическую деформацию[16];
$\delta X_f(t)$ — поправка за сезонные вариации[16].

Модели постсейсмической деформации ни для одной из рассматриваемых станций нет, поэтому данный фактор не мог повлиять на результаты анализа. Моделирование сезонных вариаций не выполнялось, т. к. период в один год слишком мал для такого моделирования, следовательно, линейная аппроксимация рассчитывалась по формуле

4 $$X(t) = X(t_0) + \dot{X}(t - t_0).$$

Проверим, насколько учет периодических движений станции позволяет уменьшить полученные ΔV_E, ΔV_N, ΔV_U на примере станции PIN1. Вычислим для каждых суток рассматриваемого интервала поправку в высоту за периодические движения станции, используя годовые и полугодовые амплитуды из ITRF2020 и формулу[16]

5 $$\delta X_f(t) = \sum_{i=1}^{2} \begin{pmatrix} a_x^i \\ a_y^i \\ a_z^i \end{pmatrix} \cos(2i\pi t) + \begin{pmatrix} b_x^i \\ b_y^i \\ b_z^i \end{pmatrix} \sin(2i\pi t),$$

где t — десятичное значение года;
a — коэффициент сезонных поправок косинуса для годовых и полугодовых амплитуд в системе ENU;
b — коэффициент сезонных поправок синуса для годовых и полугодовых амплитуд в системе ENU;
i — параметр, принимающий значение 1 при расчете годовых амплитуд и 2 при расчете полугодовых амплитуд.

Используя полученные поправки, вычислим исправленные приращения координат

6 $$X(t) = X(t_0) + \dot{X}(t - t_0) + \delta X_f(t),$$

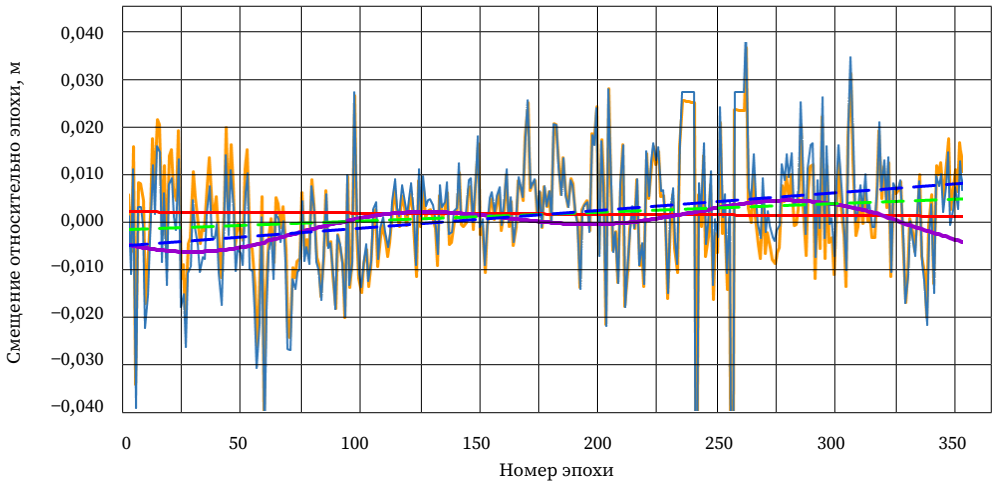
а по ним — скорость станции PIN1, используя линейную аппроксимацию. На графике, приведенном на рис. 4, отображено смещение станции PIN1 относительно первой эпохи по оси U без поправки за сезонные вариации совместно с рассчитанной скоростью, с поправкой за сезонные вариации совместно с рассчитанной скоростью, а также априорная скорость станции PIN1 по оси U и сама поправка за сезонные вариации.

Разность априорной и вычисленной скоростей при учете сезонных вариаций уменьшилась на 34 %. Исходя из этого, можно сделать вывод, что в ряде случаев расхождение априорной и вычисленной скоростей по высоте связано с периодическими движениями станции.

16 ITRF2020. [Электронный ресурс]. Режим доступа: https://itrf.ign.fr/en/solutions/itrf2020/description/more (дата обращения: 19.05.2025).

Рис. 4
График смещения станции PIN1 относительно первой эпохи по оси U

Fig. 4
Plot of the displacement of station PIN1 relative to the first epoch along the U-axis

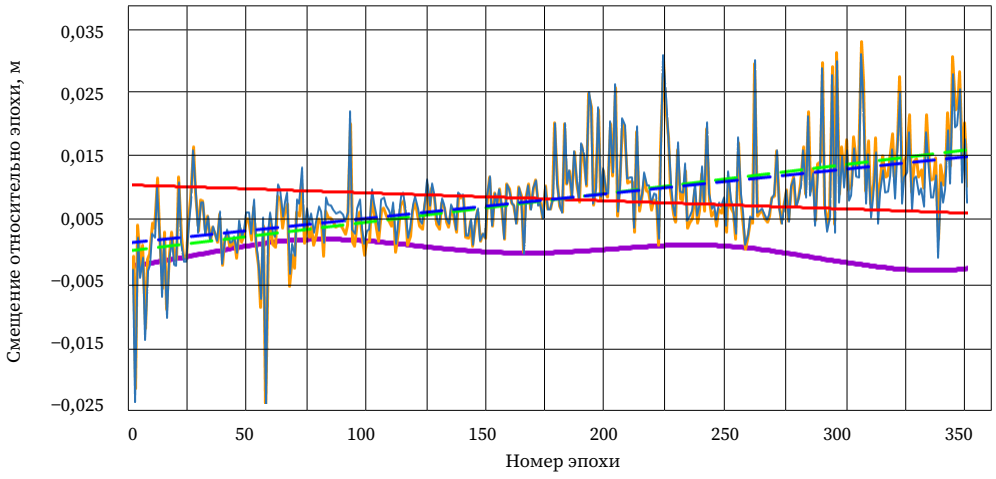


В ряде случаев разности, превышающие предельную погрешность, могут быть обусловлены особенностями априорных скоростей. Для станций HOLP и ROCK последние значения скоростей на ITRF приведены за 2021 год, для станции LBCH — за 2019 год, а для станции BILL — за 2020 год. Это связано с отсутствием данных за последующие периоды, а также с тем, что по новым измерениям, полученным после длительного перерыва, расчет актуальных скоростей еще не выполнен. По станции CRFP на всем ее периоде предоставления данных на ITRF прослеживаются сильные изменения скорости, вызванные сейсмическими активностями в районе функционирования станции. Полученные данные по скоростям с ITRF могут существенно отличаться от реальной ситуации на 2023 год. Так, для станции HOLP просматривается сильное различие априорных и рассчитанных показателей (рис. 5).

Таким образом, с учетом всех рассмотренных факторов полученные результаты достаточно хорошо сходятся с априорными и свидетельствуют о корректной работе технологии периодического уравнивания.

Рис. 5
График смещения станции HOLP относительно первой эпохи по оси U

Fig. 5
Plot of the displacement of station HOLP relative to the first epoch along the U-axis



4 Выводы

В ходе работы созданы методика и технология автоматизированного периодического уравнивания сети постоянно действующих спутниковых геодезических станций, позволяющие обеспечить высокоточное определение координат пунктов с минимальными временными и трудовыми затратами. Работоспособность технологии и возможность ее успешного применения для решения рассматриваемых задач доказана в ходе экспериментальной апробации. По результатам

исследования можно сделать следующие выводы о соответствии методики требованиям и критериям оценки эффективности, установленным в работе:

1. Разработанные методика и технология позволяют производить автоматизированное периодическое уравнивание сети постоянно действующих спутниковых геодезических станций.
2. Разработанная программная реализация помогает полностью автоматизировать процесс подготовки данных, их уравнивания в Bernese и передачи результатов на FTP-сервер, исключая необходимость ручного вмешательства оператора и возможность возникновения связанных с этим ошибок.
3. Применение автоматизированного подхода к периодическому уравниванию геодезических сетей повышает производительность по сравнению с аналогичной работой оператора в интерактивном режиме на 65,3 %. Это особенно важно для задач оперативного мониторинга, где своевременность результатов критична (при выявлении аномальных смещений в сейсмоактивных регионах)[17]. Оценка эффективности получена по результатам хронометражных исследований, выполненных в процессе апробации.
4. Использование данной технологии возможно в широком спектре задач, включая периодическое переуравнивание СДГС, геодинамические исследования, контроль целостности сетей, выявление смещений и скоростей движений пунктов, а также предоставление SINEX-файлов и координат на актуальную эпоху конечным пользователям.
5. Рассчитанные скорости рассматриваемых станций достаточно хорошо сходятся с данными реализации системы отсчета ITRF2020.
6. СКП для рассматриваемых станций в плане варьируется на интервале 5,838–13,244 мм, а по высоте — 1,589–9,758 мм. Согласно техническому отчету IGS[17], для мониторинга тектонических движений СКП определения координат не должна превышать 10 мм в плане и 20 мм по высоте. Таким образом, разработанная технология обеспечивает точность, достаточную для выявления смещений, превышающих фоновый уровень шума (постсейсмических деформаций); оценки скоростей с погрешностью, сопоставимой с ITRF2020 (табл. 2); использования в задачах поддержания национальных систем отсчета.

Предложенная технология ориентирована на научно-исследовательские и государственные центры обработки ГНСС-данных, имеющие лицензию на использование Bernese GNSS Software или GAMIT/GLOBK, а также ведущие собственные разработки программного обеспечения для уравнивания СГС. При этом предложенная в работе методика и разработанная технология могут быть использованы в совокупности с другим существующим или разрабатываемым программным обеспечением уравнивания.

Предлагаемые решения вносят вклад в развитие методов и технологий уравнивания путем методологического обеспечения надежного и воспроизводимого применения процесса уравнивания в условиях длительной автоматизированной эксплуатации. В ходе дальнейших исследований планируется расширить функционал приложения за счет интеграции дополнительных источников данных, оптимизации обработки больших массивов информации. Кроме того, предполагается применять разработанную технологию в геодинамических исследованиях с целью мониторинга деформаций и движений земной коры на основе анализа временных рядов координат пунктов СДГС.

библиография

1. Побединский Г.Г., Столяров И.А. Современное состояние государственной системы геодезического обеспечения Российской Федерации и основные направления ее развития // Интерэкспо ГЕО-Сибирь-2017. XIII Международный научный конгресс. Пленарное заседание: сборник материалов. Новосибирск: СГУГиТ, 2017. С. 14–27.

17 International GNSS Service Technical Report 2020. [Электронный ресурс]. Режим доступа: https://files.igs.org/pub/resource/technical_reports/2020_techreport.pdf (дата обращения: 03.06.2025).

2. Мазурова Е.М., Антонович К.М., Лагутина Е.К. и др. Анализ состояния государственной геодезической сети России с учетом существующих и перспективных требований // Вестник СГУГиТ. 2014. № 3 (27). С. 84–89.
3. Карпик А.П., Дюбанов А.В., Твердовский О.В. Обзор состояния использования и развития сетей референцных станций на основе инфраструктуры ГЛОНАСС в России // Интерэкспо ГЕО-Сибирь-2012. VIII Международный научный конгресс: Международная научная конференция «Геодезия, геоинформатика, картография, маркшейдерия»: сборник материалов: в 3 т. Новосибирск: СГГА, 2012. Т. 1. С. 176–182.
4. Карпик А.П., Антонович К.М., Твердовский О.В. и др. Создание сети референцных станций для обеспечения мониторинга объектов транспорта нефти и нефтепродуктов // Интерэкспо ГЕО-Сибирь-2014. X Международный научный конгресс: Пленарное заседание: сборник материалов. Новосибирск: СГГА, 2014. С. 151–161.
5. Дорогова И.Е. Влияние выбора исходных пунктов на результаты уравнивания повторных геодезических измерений // Интерэкспо ГЕО-Сибирь-2015. XI Международный научный конгресс: Международная научная конференция «Геодезия, геоинформатика, картография, маркшейдерия»: сборник материалов: в 2 т. Новосибирск: СГУГиТ, 2015. Т. 1. С. 209–213.
6. Баглай И.В., Негер О.В. Исследование точности спутникового позиционирования на примере сформированной дифференциальной сети // Аспирантские чтения: сборник научных статей аспирантов РУТ (МИИТ). М.: Перо, 2021. Вып. 4. С. 9–14.
7. Гордеев В.А., Раева О.С. Уравнивание и оценка точности GPS-построений // Известия высших учебных заведений. Горный журнал. 2016. № 6. С. 41–47.
8. Дорогова И.Е., Духовников К.С. Программное обеспечение, сервисы и открытый код для решения задач геодинамики // Интерэкспо ГЕО-Сибирь. XVIII Международный научный конгресс: сборник материалов: в 8 т. Новосибирск: СГУГиТ, 2022. Т. 1. С. 138–145. DOI:10.33764/2618-981X-2022-1-138-145.
9. Cetin S., Aydin C., Doğan U. Comparing GPS Positioning Errors Derived from GAMIT/GLOBK and Bernese GNSS Software Packages: A Case Study in CORS-TR in Turkey // Survey Review. 2018. Vol. 51. Iss. 369. P. 533–543. DOI:10.1080/00396265.2018.1505349.
10. Yu Li. Analysis of GAMIT/GLOBK in High-Precision GNSS Data Processing for Crustal Deformation // Earthquake Research Advances. 2021. Vol. 1. Iss. 3. P. 100028. DOI:10.1016/j.eqrea.2021.100028.
11. Lee S.-J., Yun H.-S. Towards Geodetic Datum Modernization: A Comparative Study of GNSS Solutions in KGD2002 Using GAMIT/GLOBK and Bernese // Applied Sciences. 2025. Vol. 15. Iss. 12. P. 6460. DOI:10.3390/app15126460.
12. Jivall L., Nilfouroushan F., Al Munaizel N. Analysis of 20 Years of GPS Data from SWEREF Consolidation Points – Using BERNESE and GAMIT-GLOBK Software. Gävle: Typography and layout Rainer Hertel, 2022. 84 p.
13. Araszkiewicz A., Figurski M., Kroszczyński K. Combining of GNSS Solutions from BERNESE and GAMIT Software // Geophysical Research Abstracts. 2010. Vol. 12. P. 4588.
14. Петрушов А.А., Смирнов В.Б., Михайлов В.О. и др. Особенности проявления аномалий сейсмического режима перед сильными землетрясениями Калифорнии // Физика Земли. 2024. № 5. С. 113–128. DOI:10.31857/S0002333724050084.
15. Debnath P., Karmakar M., Khan M.T., et al. Seismic Activity Analysis in California: Patterns, Trends, and Predictive Modeling // Journal of Computer Science and Technology Studies. 2024. Vol. 6. Iss. 5. P. 50–60. DOI:10.32996/jcsts.2024.6.5.5.

авторы

Куприянов Андрей Олегович
ФГБОУ ВО «Московский государственный университет геодезии и картографии» (МИИГАиК), Москва, Россия
кафедра прикладной геодезии, геодезический факультет
канд. техн. наук, доцент
0009-0008-9222-5579

Коробова Алиса Сергеевна
korobova.al@mail.ru
ФГБОУ ВО «Московский государственный университет геодезии и картографии» (МИИГАиК), Москва, Россия
кафедра прикладной геодезии, геодезический факультет
0009-0001-3454-3666

Морозов Дмитрий Андреевич
ФГБОУ ВО «Московский государственный университет геодезии и картографии» (МИИГАиК), Москва, Россия
кафедра прикладной геодезии, геодезический факультет
0009-0002-1254-9095

Замогильный Дмитрий
ФГБОУ ВО «Московский государственный университет геодезии и картографии» (МИИГАиК), Москва, Россия
кафедра прикладной геодезии, геодезический факультет
0009-0008-3242-1471

Поступила 09.06.2025. Принята к публикации 23.06.2026. Опубликована 30.06.2026.

UDC 528.1
DOI:10.30533/GiA-2026-024

CC BY

Development of a Methodology and Technology for Automated Periodic Adjustment of a Network of Permanent Satellite Geodetic Stations

Andrey O. Kupriyanov[1] ✉, **Alisa S. Korobova**[1], **Dmitry A. Morozov**[1], **Dmitry Zamogilny**[1]

[1] Moscow State University of Geodesy and Cartography, Moscow, Russia
✉ gnss@miigaik.ru

citation Kupriyanov AO, Korobova AS, Morozov DA, Zamogilny D. Development of a Methodology and Technology for Automated Periodic Adjustment of a Network of Permanent Satellite Geodetic Stations. *Izvestia Vuzov. Geodesy and Aerophotosurveying*. 2026;70(3): 23–41. DOI:10.30533/GiA-2026-024.

keywords satellite geodetic network adjustment, periodic adjustment, technology of adjustment automation, processing of global navigation satellite system, continuously operating reference station, station velocity

abstract To determine station velocities and monitor the integrity of satellite geodetic networks, periodic network adjustments are required. This study focuses on the development of a methodology and technology for automated periodic adjustment of a network of differential geodetic stations (CORS). The proposed methodology is based on the use of Bernese GNSS Software, its Bernese Processing Engine, and custom-developed software implemented in Python. The developed technology enables fully automated network adjustment of satellite observations, including downloading all necessary input data, processing, and publishing of solution files in SINEX format (Solution INdependent EXchange) on an FTP server. Using this approach, a test adjustment was carried out for a subset of 12 IGS stations over a 365-day period from January 1, 2023, to December 31, 2023. Station velocities were calculated together with their root mean square errors (RMS) in a topocentric horizontal coordinate system (ENU), and displacement analysis of network stations was performed based on adjusted coordinates relative to the initial epoch. This methodology can be effectively applied in geodynamic research, integrity monitoring of CORS networks, detection of station displacements, and computation of site velocity vectors.

references

1. Pobedinskii GG, Stolyarov IA. Sovremennoe sostoyanie gosudarstvennoi sistemy geodezicheskogo obespecheniya Rossiiskoi Federatsii i osnovnye napravleniya ee razvitiya [Modern Status of the State System of Geodesic Support of the Russian Federation and the Main Directions of Its Development]. *Interexpo GEO-Siberia-2017. XIII International Scientific Congress. Plenary Settlement: collection of materials.* Novosibirsk: SGUGiT; 2017: 14–27. (In Russian).

2. Mazurova EM, Antonovich KM, Lagutina EK, et al. Analiz sostoyaniya gosudarstvennoi geodezicheskoi seti Rossii s uchetom sushchestvuyushchikh i perspektivnykh trebovanii [Analysis of the State of the National Geodetic Network of Russia Considering Existing and Prospective Requirements]. ***Vestnik SSUGT.*** 2014;3(27): 84–89. (In Russian).
3. Karpik AP, Dyubanov AV, Tverdovskii OV. Obzor sostoyaniya ispol'zovaniya i razvitiya setei referentsnykh stantsii na osnove infrastruktury GLONASS v Rossii [Review of Reference Systems Use and Development on the Basis of Russian GLONASS Infrustructure]. ***Interexpo GEO-Siberia-2012. VIII International Scientific Congress: Proceedings of the International Scientific Conference "Geodesy, Geoinformatics, Cartography, Surveying".*** In 3 vols. Vol. 1. Novosibirsk: SSGA; 2012: 176–182. (In Russian).
4. Karpik AP, Antonovich KM, Tverdovskii OV, et al. Sozdanie seti referentsnykh stantsii dlya obespecheniya monitoringa ob"ektov transporta nefti i nefteproduktov [Creating Reference Station Network for Monitoring Objects and Oil Transportation]. ***Interexpo GEO-Siberia-2014. X International Scientific Congress. Plenary Settlement: collection of materials.*** Novosibirsk: SSGA; 2014: 151–161. (In Russian).
5. Dorogova IE. Vliyanie vybora iskhodnykh punktov na rezul'taty uravnivaniya povtornykh geodezicheskikh izmerenii [Influence of the Choice of Initial Points on the Results of Adjustment of Repeated Geodetic Measurements]. ***Interexpo GEO-Siberia-2015. XI International Scientific Congress: Proceedings of the International Scientific Conference "Geodesy, Geoinformatics, Cartography, Surveying".*** In 2 vols. Vol. 1. Novosibirsk: SSUGT; 2015: 209–213. (In Russian).
6. Baglai IV, Neger OV. Issledovanie tochnosti sputnikovogo pozitsionirovaniya na primere sformirovannoi differentsial'noi seti [Study of the Accuracy of Satellite Positioning Using the Example of a Formed Differential Network]. ***Postgraduate Readings: a collection of scientific articles by graduate students of the Russian University of Transport (MIIT).*** Moscow: Pero; 2021(4): 9–14. (In Russian).
7. Gordeev VA, Raeva OS. Uravnivanie i otsenka tochnosti GPS-postroenii [Adjustment and Accuracy Assessment of GPS Constructions]. ***Minerals and Mining Engineering.*** 2016;6: 41–47. (In Russian).
8. Dorogova IE, Dukhovnikov KS. Programmnoe obespechenie, servisy i otkrytyi kod dlya resheniya zadach geodinamiki [Software, Services, and Open Source for Solving Geodynamic Problems]. ***Interexpo Geo-Siberia. Proceedings of the XVIII International Scientific Congress.*** In 8 vols. Vol. 1. Novosibirsk: SSUGT; 2022: 138–145. (In Russian). DOI:10.33764/2618-981X-2022-1-138-145.
9. Cetin S, Aydin C, Doğan U. Comparing GPS Positioning Errors Derived from GAMIT/GLOBK and Bernese GNSS Software Packages: A Case Study in CORS-TR in Turkey. ***Survey Review.*** 2018;51(369): 533–543. DOI:10.1080/00396265.2018.1505349.
10. Yu Li. Analysis of GAMIT/GLOBK in High-Precision GNSS Data Processing for Crustal Deformation. ***Earthquake Research Advances.*** 2021;1(3): 100028. DOI:10.1016/j.eqrea.2021.100028.
11. Lee SJ, Yun HS. Towards Geodetic Datum Modernization: A Comparative Study of GNSS Solutions in KGD2002 Using GAMIT/GLOBK and Bernese. ***Applied Sciences.*** 2025;15(12): 6460. DOI:10.3390/app15126460.
12. Jivall L, Nilfouroushan F, Al Munaizel N. ***Analysis of 20 Years of GPS Data from SWEREF Consolidation Points – Using BERNESE and GAMIT-GLOBK Software.*** Gävle: Typography and layout Rainer Hertel; 2022. 84 p.
13. Araszkiewicz A, Figurski M, Kroszczyński K. Combining of GNSS Solutions from BERNESE and GAMIT Software. ***Geophysical Research Abstracts.*** 2010;12: 4588.
14. Petrushov AA, Smirnov VB, Mikhailov VO i dr. Osobennosti proyavleniya anomalii seismicheskogo rezhima pered sil'nymi zemletryaseniyami Kalifornii [Features of Seismicity Anomalies before Strong Earthquakes in California]. ***Izvestiya, Physics of the Solid Earth.*** 2024;5: 113–128. (In Russian). DOI:10.31857/S0002333724050084.
15. Debnath P, Karmakar M, Khan MT, et al. Seismic Activity Analysis in California: Patterns, Trends, and Predictive Modeling. ***Journal of Computer Science and Technology Studies.*** 2024;6(5): 50–60. DOI:10.32996/jcsts.2024.6.5.5.

authors

Andrey O. Kupriyanov
Moscow State University of Geodesy and Cartography, Moscow, Russia
Department of Applied Geodesy, Faculty of Geodesy
PhD in Engineering, Associate Professor
0009-0008-9222-5579

Alisa S. Korobova
korobova.al@mail.ru
Moscow State University of Geodesy and Cartography, Moscow, Russia
Department of Applied Geodesy, Faculty of Geodesy
0009-0001-3454-3666

Dmitry A. Morozov
Moscow State University of Geodesy and Cartography, Moscow, Russia
Department of Applied Geodesy, Faculty of Geodesy
0009-0002-1254-9095

Dmitry Zamogilny
Moscow State University of Geodesy and Cartography, Moscow, Russia
Department of Applied Geodesy, Faculty of Geodesy
0009-0008-3242-1471

Submitted: June 9, 2025. Accepted: June 23, 2026. Published: June 30, 2026.