

М. А. Смоляков^{1}, А. В. Елагин¹*

Разработка приложения для уравнивания базовых линий, полученных в результате обработки ГНСС-измерений в программе RTKLIB

¹Сибирский государственный университет геосистем и технологий, г. Новосибирск, Российская Федерация
* e-mail: 89231417922@yandex.ru

Аннотация. В работе выявлены основные недостатки свободного программного обеспечения RTKLIB, такие как отсутствие возможности обработки и уравнивания геодезических сетей, состоящих из базовых линий, а также необходимость ручного ввода всех данных при использовании сторонних специализированных программ для уравнивания. Разработано приложение, реализующее процесс уравнивания параметрическим методом базовых линий, полученных с использованием программы RTKLIB. С целью тестирования, проведен численный эксперимент. По одним тем же исходным данным выполнено уравнивание базовых линий сети с использованием разработанного приложения и коммерческой программы Trimble Business Center. В качестве эталонных координат были взяты координаты пунктов координатной основы ITRF-2020 в Соединенных Штатах Америки и Республиках Кыргызстан и Казахстан. Наибольшее расхождение получено на пункте CHIL (Лос-Анджелес, США) по направлению оси Z – 55 мм. Высказано предположение, что причиной таких расхождений может быть использование в RTKLIB рекуррентного фильтра Калмана, недостатком которого является накопление погрешностей в оцениваемых параметрах и ковариационной матрице на длинных интервалах сессий. Продемонстрирован графический интерфейс приложения, алгоритм работы с программой и состав выходного файла с результатами обработки. Указана возможность дальнейшей модернизации приложения с целью улучшения результатов уравнивания.

Ключевые слова: уравнивание спутниковых геодезических сетей, параметрический способ уравнивания, ковариация, базовая линия, RTKLIB

М. А. Smolyakov^{1}, A. V. Yelagin¹*

Development of an application for adjusting baselines obtained from GNSS measurements processed in the RTKLIB software

¹Siberian State University of Geosystems and Technologies, Novosibirsk, Russian Federation
* e-mail: 89231417922@yandex.ru

Abstract. The main disadvantages of free RTKLIB software, such as the lack of processing and adjustment of geodetic networks consisting of baselines, as well as the need for manual input of all data when using third-party specialized programs for adjustment, were identified in the work. Developed an application that realizes the adjustment process of baselines, obtained using the RTKLIB program, by the parametric method. For testing purposes, a numerical experiment was carried out. With the same initial data, the adjustment of base lines of the network was performed with the use of the developed application and commercial program Trimble Business Center. Coordinates of the ITRF-2020 coordinate base points in the United States of America and the Republics of Kyrgyzstan and Kazakhstan were taken as the reference coordinates. The largest discrepancy was found at CHIL point (Los Angeles, USA) in the Z-axis direction - 55 mm. The assumption has been made

that the discrepancies could be caused by the use of the recursive Kalman filter in RTKLIB, which has a drawback of accumulating errors in the estimated parameters and covariance matrix over long session intervals. The graphical interface of the application, an algorithm of work with the program and a composition of the output file with results of processing are demonstrated. The possibility of further modernization of the application in order to improve the results of adjustment is indicated.

Keywords: adjustment of satellite geodetic networks, parametric method of adjustment, covariation, baseline, RTKLIB

Введение

В настоящий момент RTKLIB [1, 2] является одной из наиболее распространенных в научной среде программ для обработки «сырых» данных ГНСС-измерений. Высокая популярность приложения обусловлена двумя факторами. Во-первых, свободное распространение RTKLIB предоставляет возможность использования программы в любых научных исследованиях вне зависимости от их бюджета. Во-вторых, открытый исходный код приложения позволяет любому пользователю редактировать и добавлять новые функциональные возможности в зависимости от собственных нужд.

Однако, несмотря на то, что RTKLIB обладает явными преимуществами по сравнению с коммерческими приложениями, такими как Trimble Business Center (ТВС) [3], Leica Infinity [4] и КРЕДО ГНСС [5], она также имеет ряд ограничений, которые отсутствуют в этих инструментах. В частности, в RTKLIB нет возможности для обработки сети, состоящей из нескольких базовых линий, что также исключает сетевое решение. Данный недостаток существенно ограничивает область применения приложения и вынуждает пользователя искать альтернативу, например, использование сторонних специализированных программ, таких как Java Applied Geodesy (JAG3D) [6] и SNAP [7]. Однако, работа с ними может занимать много времени, поскольку они не поддерживают выходной файл обработки измерений RTKLIB в формате `pos`, что требует ручного ввода всех данных.

Для решения перечисленных проблем было разработано приложение, способное уравнивать спутниковые сети, состоящие из базовых линий (БЛ), полученных в результате обработки ГНСС-измерений в RTKLIB.

Параметрический способ уравнивания

Для обработки базовых линий спутниковой геодезической сети был выбран параметрический метод уравнивания, так как он дает возможность автоматически формировать уравнения связи, независимо от количества пунктов. Кроме того, в этом методе обратную матрицу коэффициентов нормальных уравнений можно одновременно использовать и для определения искомых параметров, и для общей оценки точности уравненных элементов сети. Отмеченные особенности объясняют преимущественное использование этого способа уравнивания при автоматизированной обработке геодезических сетей [8].

Порядок реализации параметрического метода уравнивания для неравноточных измерений выглядит следующим образом. Имеется спутниковая геодезическая сеть, в которой выполнено n измерений. Число необходимых неизвестных –

k , причем соблюдается условие $n > k$ [9]. В первую очередь вычисляются приближенные координаты искомых пунктов X_0, Y_0, Z_0 . В результате уравнивания определяют в эти координаты поправки $\delta x, \delta y, \delta z$ и поправки V_X, V_Y, V_Z в измеренные приращения координат D_X, D_Y, D_Z . Например, для поправки V_{Xij} в компонент D_{Xij} вектора, который соединяет пункты i и j , составляется уравнение [10, 11]:

$$V_{Xij} = D_{Xij} = \left(X_j^0 + \delta x_j \right) - \left(X_i^0 + \delta x_i \right). \quad (1)$$

Переносом D_{Xij} в правую часть выражения и раскрытием скобок получаем:

$$V_{Xij} = \delta x_j - \delta x_i + l_{Xij}, \quad (2)$$

где $l_{Xij} = \left(X_j^0 - X_i^0 \right) - D_{Xij}$ – свободный член уравнения поправок V_{Xij} .

Для всех уравнений поправок в матричной записи будем иметь [10, 11]:

$$V = A\delta + L, \quad (3)$$

где V – вектор поправок в компоненты БЛ размером n ;

δ – вектор неизвестных координат определяемых пунктов размером k ;

A – матрица коэффициентов размером $n \times k$;

L – вектор свободных членов l размером n .

Требование МНК заключается в том, чтобы взвешенная сумма квадратов поправок $V^T P V$ удовлетворяла условию $V^T P V = \min$. Отсюда следует система нормальных уравнений для вычисления параметров δ [10, 11]:

$$A^T P A \delta + A^T P L = 0, \quad (4)$$

где P – матрица весовых коэффициентов.

Заменив $A^T P A$ на N , а $A^T P L$ на b выражение (4) принимает вид [9, 11]:

$$N \delta + b = 0. \quad (5)$$

Решение системы нормальных уравнений выглядит (5) следующим образом:

$$\delta = -N^{-1} b. \quad (6)$$

При помощи рассчитанных величин δ можно найти уравненные значения необходимых неизвестных \tilde{X}_j по формуле:

$$\tilde{X}_j = X_j^0 + \delta_j. \quad (7)$$

Значения поправок в измеренные величины получают по формуле (3). Уравненные компоненты БЛ \tilde{D}_{Xij} находят в соответствии с выражением:

$$\tilde{D}_{Xij} = D_{Xij} + V_{Xij}. \quad (8)$$

На последнем этапе выполняется оценка точности. Ошибка единицы веса μ определяется по формуле [9, 11]:

$$\mu = \sqrt{\frac{V^T P V}{n - k}}. \quad (9)$$

Стандартные отклонения поправок в координаты и измерения находят из соответствующих ковариационных матриц результатов уравнивания согласно формулам [11]:

$$K_X = \mu^2 N^{-1}, \quad (10)$$

$$K_V = A K_X A^T, \quad (11)$$

$$\mu_{Xii} = \sqrt{K_{Xii}}, \quad (12)$$

$$\mu_{Vjj} = \sqrt{K_{Vjj}}, \quad (13)$$

где K_X – ковариационная матрица поправок в координаты пунктов;

K_V – ковариационная матрица поправок в измерения;

μ_{Xii} – стандартное отклонение i -го элемента вектора поправок в координаты;

μ_{Vjj} – стандартное отклонение j -го элемента вектора поправок в измерения;

K_{Xii} – i -ый элемент матрицы K_X ;

K_{Vjj} – j -ый элемент матрицы K_V .

Реализация параметрического метода в разработанном приложении имеет одну особенность. Она заключается в том, что вместо весовой матрицы P в решении системы нормальных уравнений использовалась матрица K , получаемая по формулам:

$$d = \text{tr}(Q)/n, \quad (14)$$

$$Q_N = Q/d, \quad (15)$$

$$K = Q_N^{-1}, \quad (16)$$

где $\text{tr}(Q)$ – след ковариационной матрицы;

d – квадрат стандартного отклонения (дисперсия) исходных данных;

Q – ковариационная матрица исходных данных, содержащая d ;

Q_N – ковариационная матрица исходных данных без d .

В качестве дисперсии исходных данных взято среднее значение диагональных элементов ковариационной матрицы.

Разработка приложения для уравнивания спутниковых сетей

Название разработанного приложения – Adjustment for RTKLIB.

В связи с простотой синтаксиса, а также наличием большого количества обучающего материала, для написания приложения был выбран язык программирования Python [12]. Создание программы осуществлялось в интегрированной среде разработки PyCharm [13], в одном из самых распространенных и многофункциональных инструментов для редактирования и отладки кода.

Процесс уравнивания геодезических измерений предполагает различные операции с матрицами. Однако стандартные средства Python не обладают достаточно широкими возможностями для работы с ними. В связи с этим, было принято решение использовать библиотеку NumPy [14], предоставляющую удобные инструменты для эффективной работы с матричными объектами.

Реализация графического интерфейса выполнялась при помощи библиотеки PyQt6 [15]. Приложение выглядит следующим образом (рис. 1).

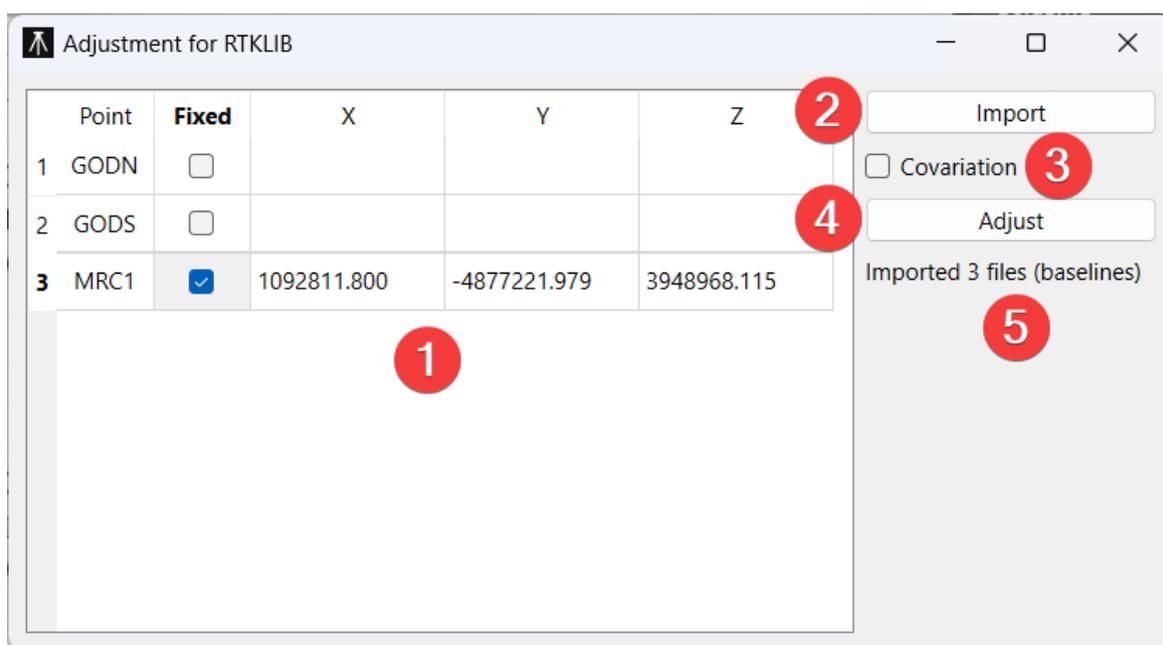


Рис. 1. Внешний вид приложения

Состав окна приложения в соответствии с номерами рисунка:

- 1) таблица исходных данных;
- 2) кнопка импорта;
- 3) чек-бокс учета ковариации;
- 4) кнопка уравнивания;

5) информационная строка.

Последовательность работы с программой выглядит следующим образом.

Шаг № 1. После запуска приложения появляется главное окно с пустой таблицей. Нажатие кнопки «Import» вызывает диалоговое окно, в котором требуется выбрать директорию с файлами обработки БЛ. Осуществив выбор, программа извлечет необходимую информацию, а именно:

- имя и референсные координаты базовой станции;
- имя и вычисленные координаты станции-ровера;
- элементы ковариационной матрицы.

Количество импортированных файлов выводится в информационной строке.

Шаг № 2. Формируется таблица, содержащая в первом столбце названия станций. Для обозначения какого-либо из пунктов как опорного необходимо в соответствующей строке второго столбца переключить чек-бокс и ввести прямоугольные координаты.

Шаг № 3. Отметка чек-бокса «Covariaton» дает возможность включить в уравнивание ковариационные матрицы каждой отдельной БЛ, что позволяет, хоть и незначительно, но улучшить результаты обработки.

Шаг № 4. После нажатия кнопки «Adjust» производится уравнивание спутниковой сети. Результаты обработки сохраняются в той же директории, где находятся исходные файлы. Пример выходного файла выглядит следующим образом (рис. 2).

```
2023-05-04 13:02:37 1
Covariance = False

---Accuracy evaluation---
Value name      Value 2
Standard dev    0.0190

---Fixed pos---
Point name      X      Y      Z
MRC1            3 1092811.8000 -4877221.9790 3948968.1150

---Adjusted coordinates---
Point name      X      Y      Z      dX      dY      dZ      mX      mY      mZ
GODN            4 1130760.7534 -4831298.6477 3994155.1469 -0.1248 0.0449 -0.0450 0.0002 0.0002 0.0002
GODS            1130752.1922 -4831349.0878 3994098.9112 -0.1213 0.0365 -0.0390 0.0002 0.0002 0.0002

---Adjusted measurements---
Baseline name   X      Y      Z      dX      dY      dZ      mX      mY      mZ
GODS-GODN      8.5613 50.4402 56.2356 -0.0034 0.0085 -0.0061 0.0002 0.0002 0.0002
MRC1-GODN      5 37948.9534 45923.3313 45187.0319 0.0034 -0.0085 0.0061 0.0002 0.0002 0.0002
MRC1-GODS      37940.3922 45872.8912 45130.7962 -0.0034 0.0085 -0.0061 0.0002 0.0002 0.0002
```

Рис. 2. Файл результатов уравнивания спутниковой сети

Состав файла с результатами уравнивания сети, состоящей из БЛ:

- 1) информация о дате и времени уравнивания, а также учете ковариации;
- 2) блок оценки точности;
- 3) блок опорных пунктов;

4) блок уравненных координат искомых пунктов, поправок к ним и их средние отклонения;

5) блок уравненных измерений, поправок к ним и их средние отклонения.

Среди особенностей Adjustment for RTKLIV можно выделить то, что:

– импорт данных всех БЛ в сети, выполняется выбором директории, где находятся все файлы результатов обработки RTKLIV;

– отсутствие возможности ввода всех данных вручную;

– расчеты выполняются только в прямоугольных СК;

– возможна обработка одиночной БЛ;

– поддерживается уравнивание сети с повторными измерениями БЛ;

– необходимо в уравниваемой сети обязательно иметь один опорный пункт и один искомый;

– отсутствуют ограничение на общее количество пунктов;

– есть возможность учета ковариации компонентов БЛ при уравнивании, в тех случаях, когда обратная ковариационная матрица может быть найдена.

Сравнение результатов работы созданной программы с ТВС

Для проверки работоспособности созданной программы был выполнен эксперимент, в ходе которого уравненные координаты, полученные при помощи ТВС [3] и данного приложения, сравнивались с эталонными.

В рамках исследования уравнивались 3 спутниковые сети, преимущественно состоящие из пунктов IGS [16]. Первая сеть располагается на границе Республик Кыргызстана и Казахстана, вторая – в Вашингтоне и третья – в Лос-Анджелесе. Основная информация о данных спутниковых сетях представлена в табл. 1.

Таблица 1

Характеристика спутниковых сетей

Номер спутниковой сети	Локация	Опорные пункты	Уравниваемые пункты	Число пунктов	Число БЛ
1	Граница Республик Кыргызстан и Казахстан	ВК0	СНУМ, РОЛ2	3	3
2	Вашингтон	МРС1	ГОДС, ГОДН	3	3
3	Лос-Анджелес	СМР9, ВНС1	СНН, СТ1, НОЛР, РПМ, ВЛСН	7	12

Такой выбор обусловлен тем фактом, что расстояние между соседними пунктами IGS в этих районах составляет в среднем около 30 км. Это дает возможность получать фиксированные решения базовых линий.

Суточные файлы наблюдений, навигационного сообщения и точных эфемерид в формате RINEX [17] загружались из архива службы CDDIS [18]. Эталон-

ные координаты для пунктов спутниковых сетей были получены с сайта Международной Наземной Системы Отсчета (ITRF) [19] в системе координат ITRF20.

Обработка БЛ в программах TBC и RTKLIV выполнялась с использованием одного значения маски возвышения, установленного на 15 градусах, а также при условии включения в обработку только спутников системы GPS. Дополнительно в RTKLIV импортировался файл формата ANTEX [20], который содержит информацию о фазовых центрах большинства ГНСС-антенн.

В результате дальнейшей обработки в TBC и в собственном приложении были получены уравненные координаты пунктов сетей. Сравнение уравненных и эталонных координат приведено в табл. 2.

Таблица 2

Сравнение эталонных координат пунктов с результатами уравнивания программ Adjustment for RTKLIV (с ковариацией и без) и TBC

Наименование пункта	Разность уравненных и эталонных координат, м								
	Trimble Business Center			RTKLIV + Adjustment for RTKLIV (без учета взаимных ковариации)			RTKLIV + Adjustment for RTKLIV (с учетом взаимных ковариации)		
	X	Y	Z	X	Y	Z	X	Y	Z
CHUM	-0,001	-0,001	0,001	-0,023	-0,037	-0,021	-0,022	-0,038	-0,021
POL2	-0,002	0,001	-0,002	-0,010	-0,011	-0,023	-0,010	-0,011	-0,023
GODS	-0,001	0,005	0,000	0,008	-0,019	0,037	-	-	-
GODN	-0,001	0,001	0,001	0,012	-0,029	0,043	-	-	-
CHIL	-0,001	0,000	0,005	-0,004	-0,055	0,042	-	-	-
CIT1	0,006	0,001	0,005	0,001	-0,014	0,012	-	-	-
HOLP	-0,001	0,005	0,015	0,006	0,036	-0,045	-	-	-
JPLM	0,000	0,003	0,001	0,019	0,022	-0,023	-	-	-
WLSN	-0,005	-0,014	0,001	0,025	-0,005	0,019	-	-	-

В таблице 2 оранжевым цветом обозначены наибольшие отклонения от эталонных координат, зеленым – наименьшие.

Обсуждение

Точность результатов уравнивания спутниковых сетей при помощи разработанной программы оказалась ниже, чем при использовании TBC. Разница между программным обеспечением составляет в среднем около 2 см. Такой результат может быть вызван несколькими причинами. Во-первых, вероятнее всего, в TBC заложены более продвинутые алгоритмы получения БЛ и их уравнивания. Во-вторых, весь цикл обработки происходит в одной программе, обрабатывающей одновременно все измерения, что позволяет получить ковариации между всеми компонентами разных БЛ, чего невозможно сделать в работе с RTKLIV. В-третьих, RTKLIV использует рекуррентный фильтр Калмана при постобработке ГНСС-измерений [2], который обладает свойством накопления погрешностей в

оцениваемых параметрах и ковариационных матрицах на длинных интервалах сессий.

Уравнивание с учетом взаимных ковариаций компонентов внутри каждой БЛ показало незначительное улучшение качества, порядка 1 мм. Для сетей Вашингтона и Лос-Анджелеса не были получены решения, включающие учет взаимных ковариаций исходных данных, как следствие необратимости ковариационной матрицы.

Заключение

Таким образом, созданное приложение способно производить уравнивание спутниковой геодезической сети любой конфигурации, в том числе состоящей только из независимых БЛ. Основные преимущества перед аналогичными программами заключаются в простоте графического интерфейса, быстром импорте информации о БЛ из файлов постобработки RTKLIB, а также возможности включения учета ковариации исходных данных.

Выявлено отличие результатов уравнивания разработанного приложения и коммерческой программой ТВС. На основе одних и тех же исходных данных, ТВС позволяет получать координаты пунктов отличные от эталонных значений на величину порядка 1 см. В тоже время Adjustment for RTKLIB показывает отклонения, порядка 2 см от результатов обработки в ТВС. Основной причиной несоответствия, по-видимому, является применение в RTKLIB для обработки БЛ фильтра Калмана, которому свойственно накопление ошибок с увеличением продолжительности сессии [2].

Предполагается дальнейшее совершенствование программы, что позволит улучшить качество уравнивания базовых линий, полученных программой RTKLIB. Тем не менее, уже сейчас можно утверждать, что текущая версия приложения может применяться для решения разных научных и инженерных задач.

БИБЛИОГРАФИЧЕСКИЙ СПИСОК

1. Программное обеспечение RTKLIB [Электронный ресурс]. – URL: <https://rtklib.com/> (дата обращения: 02.03.2023).
2. Документация RTKLIB [Электронный ресурс]. – URL: https://rtk-lib.com/rtklib_document.htm (дата обращения: 02.03.2023).
3. Программное обеспечение Trimble Business Center (ТВС) [Электронный ресурс]. – URL: <https://geospatial.trimble.com/software/trimble-business-center/download> (дата обращения: 02.03.2023).
4. Программное обеспечение Leica Infinity [Электронный ресурс]. – URL: <https://leica-geosystems.com/ru/products/gnss-systems/software/leica-infinity> (дата обращения: 02.03.2023).
5. Программное обеспечение КРЕДО ГНСС [Электронный ресурс]. – URL: <https://credodialogue.ru/produkty/korobochnye-produkty/691-credo-gnss-naznachenie.html> (дата обращения: 12.05.2023).
6. Программное обеспечение Java Applied Geodesy 3D (JAG3D) [Электронный ресурс]. – URL: <https://software.applied-geodesy.org/en/> (дата обращения: 02.03.2023).
7. Программное обеспечение SNAP & CONCORD [Электронный ресурс]. – URL: <https://www.linz.govt.nz/products-services/geodetic/geodetic-software-downloads/snap-concord-downloads> (дата обращения: 02.03.2023).

8. Попов В.Н. Геодезия / В.Н. Попов, С.И. Чекалин. – Москва: Изд-во Горная книга, 2007. – 518 с.
9. Лукашенко В.А. Основные методы уравнивания геодезических сетей: для студентов, обучающихся по направлению 21.05.01 «Прикладная геодезия»: учебно-методическое пособие / В.А. Лукашенко. – Владивосток: Изд-во Дальневост. федерал. ун-та, 2022. – 45 с.
10. Гришко С.В. Уравнивание спутниковых сетей. Предварительная оценка точности проектов спутниковых измерений: учебно-метод. пособие / С.В. Гришко. – Пермь: Изд-во Перм. гос. техн. ун-та, 2010. – 20 с.
11. Телеганов Н.А. Высшая геодезия и основы координатно-временных систем: Учебное пособие / Н.А. Телеганов, А.В. Елагин. – Новосибирск: СГГА, 2004. – 216 с.
12. Welcome to Python.org [Электронный ресурс]. – URL: <https://www.py-thon.org/> (дата обращения: 02.03.2023).
13. Интегрированная среда разработки PyCharm [Электронный ресурс]. – URL: <https://www.jetbrains.com/pycharm/> (дата обращения: 02.03.2023).
14. Библиотека NumPy [Электронный ресурс]. – URL: <https://numpy.org/> (дата обращения: 02.03.2023).
15. Библиотека PyQt6 [Электронный ресурс]. – URL: <https://www.riverbankcomputing.com/software/pyqt/> (дата обращения: 12.05.2023).
16. International GNSS Service (IGS) [Электронный ресурс]. – URL: <https://igs.org/> (дата обращения: 12.05.2023).
17. RINEX 4.00 [Электронный ресурс]. – URL: https://files.igs.org/pub/data/format/rinex_4.00.pdf (дата обращения: 12.05.2023).
18. The Crustal Dynamics Data Information System (CDDIS) [Электронный ресурс]. – URL: <https://cddis.nasa.gov/> (дата обращения: 12.05.2023).
19. International Terrestrial Reference Frame (ITRF) [Электронный ресурс]. – URL: <https://itrf.ign.fr/en/homepage> (дата обращения: 12.05.2023).
20. Formats and Standards of International GNSS Service [Электронный ресурс]. – URL: <https://igs.org/formats-and-standards/> (дата обращения: 12.05.2023).

© М. А. Смоляков, А. В. Елагин, 2023