



**АВТОМАТИЗАЦИЯ ЭФФЕКТИВНОЙ МЕТОДИКИ ОБРАБОТКИ
ДАННЫХ GPS-НАБЛЮДЕНИЙ В ПРОГРАММНОМ КОМПЛЕКСЕ GLOBK**

А. Н. Мансуров

*Научная станция РАН, E-mail: sur@gdirc.ru, sur98ke@gmail.com,
г. Бишкек 720049, Киргизия*

Обсуждено применение высокоточных GPS-наблюдений для оценки скоростей точек на поверхности горных массивов любого масштаба и окружающих их областей. Приведено описание существующих технологий и методики расчета скоростей и временных рядов координат реперных точек по данным GPS-наблюдений. Рассмотрены возникающие при следовании этой методике проблемы, затрудняющие получение наиболее точных результатов расчета. Предложены средства автоматизации ранее не автоматизированных этапов методики, что многократно снизило трудоемкость решения этих проблем и применения методики в целом.

GPS, репер, скорости, геодинамика, GAMIT, GLOBK, SUR_GPS_GLOBK_PROCESSING

**AUTOMATING EFFICACIOUS APPROACH TO PROCESS
GPS OBSERVATIONS DATA IN GLOBK SOFTWARE SUITE**

A. N. Mansurov

*Research Station of Russian Academy of Sciences in Bishkek,
E-mail: sur@gdirc.ru, sur98ke@gmail.com, Bishkek 720049, Kyrgyzstan*

This paper discusses using high-precision GPS observations to compute the velocities of points on the surface of mountain massif of any scale and surrounding territories. It describes the existing technology and method for computing velocities and coordinate time series of geodetic benchmarks using GPS observation data. Then, the problems that hinder to obtain most possible precise results of this computation are reviewed in this paper. Finally, it suggests the tools to automate stages of this method that haven't been previously automated, these tools multiply decrease labor intensity in solving these problems and applying this method in general.

GPS, benchmark, velocities, geodynamics, GAMIT, GLOBK, SUR_GPS_GLOBK_PROCESSING

Изначально созданная для нужд навигации технология GPS была вскоре адаптирована для нужд геодезии. При навигации точность определения положения GPS-приемника имеет порядок единиц метров, но если использовать специальные высокотехнологичные антенны и приемники и записывать данные в течение суток или более продолжительное время, то можно с миллиметровой точностью получить оценку расстояния между антеннами, удаленными друг от друга на расстояния от нескольких метров до тысяч километров. Это позволяет оценивать и изучать современные движения и деформации как на масштабах отдельных горных массивов и выработок месторождений [1], так и горных систем [2, 3], тектонических плит [4] и даже всего земного шара [5].

Для получения высокой точности измерений расстояния используется метод двойных разностей, в радиотехнике называемый интерферометрией. Обработка данных с помощью этой процедуры достаточно трудоемка, и в мире существует лишь несколько ее реализаций в виде компьютерных программ. Наиболее гибким и мощным из них является программный комплекс (ПК) GAMIT/GLOBK, разработанный в MIT [6]. Обработка данных в нем разделена на два этапа.

Сначала при помощи GAMIT объединяются сконвертированные в формат RINEX данные с антенн, установленных на нескольких (до ~50) геодезических реперах. На этом этапе применяется метод двойных разностей, поэтому желательно, чтобы эти реперы располагались близко друг к другу, не более чем на единицы градусов географических координат. Исходные данные для GAMIT сильно зашумлены и подвержены определенному рода систематическим ошибкам, поэтому в процессе обработки осуществляется осреднение данных, записанных в течение суток. Большая надежность достигается за счет избыточности задачи: для N реперов требуется оценить $3N$ параметров (их координаты в пространстве), а количество измеренных с хорошей точностью величин (расстояний между реперами — базовых линий) равно $N(N - 1)/2$. Кроме того, используются априорные координаты реперов, а также дополнительные грубо измеренные параметры: координаты спутников, расстояния спутник–антенна. За каждые сутки удается получить оценки координат реперов, вошедших в обработку и матрицу ковариации этих оценок. Результаты работы GAMIT сохраняются в так называемом h-файле, и затем необходимые для дальнейшей обработки данные конвертируются в glx-файл.

Одна из существенных особенностей результатов GAMIT, сохраняемых в glx-файл, состоит в том, что на основании хорошо измеренных базовых линий нельзя точно определить абсолютное положение в пространстве всего набора реперов. Эта проблема устраняется на втором этапе — обработке в GLOBK, основное назначение которого — применение фильтра Кальмана к оценкам координат реперов в разные моменты времени. Фильтр Кальмана работает из предположения, что большинство реперов движутся с постоянной (не меняющейся во времени) скоростью, исходя из чего данные каждого отдельного glx-файла могут быть смещены или повернуты в пространстве (смещение и поворот становятся почти жесткими вследствие значений матрицы ковариации координат). GLOBK также позволяет предварительно объединять несколько glx-файлов за несколько дней и/или из нескольких GAMIT-решений с пересекающимися наборами реперов в один GLX-файл (комбинирование). Комбинирование позволяет “привязать” региональную сеть к глобальной сети IGS, для реперов которой задана качественная система отсчета — каталог координат реперов на некоторый момент времени и их скоростей (с указанием неопределенности всех компонент каталога). Для систем отсчета характерна возможность независимо друг от друга вращать и смещать совокупности “начал” и “концов” векторов скорости вокруг центра Земли.

Согласно общепринятой для больших сетей мониторинга методике, на небольшом количестве реперов данные записываются постоянно, а остальные посещаются периодически. При каждом посещении запись данных ведется от 1 до 3–4 суток (полевые наблюдения) [7]. Так как все реперы одинаково важны для исследования деформационных процессов, данные редких полевых измерений имеют большую ценность, чем аналогичные по объему данные с постоянно наблюдаемых реперов. Часто для каталогизации информации о наблюдениях ее сводят в базу данных [8], которая предоставляет вспомогательные данные в численную процедуру (например, сведения о плохой погоде — источнике погрешностей). Такой подход принят в Научной станции РАН в Бишкеке, где применяется описанная методика.

МЕТОДИЧЕСКИЕ ОСОБЕННОСТИ ОБРАБОТКИ ДАННЫХ В ПК GLOBK

Обработка данных в ПК GLOBK обычно происходит в три этапа: 1) комбинирование glx-файлов; 2) расчет предварительных скоростей всех реперов (по сути — создание системы отсчета, в которую включены все обрабатываемые реперы); 3) расчет итоговых скоростей и временных рядов координат реперов.

Результатами комбинирования являются укрупненные glx-файлы (традиционно называемые GLX — по одному на каждый интервал). особенность комбинирования заключается в том, что интервалы не должны быть слишком большими, при этом желательно, чтобы каждое полевое наблюдение попало целиком в один GLX-файл и не попало в другие. Так как полевые наблюдения могут быть расположены во времени цепочкой с пересечениями, то интервалы комбинирования тоже должны пересекаться, и для каждого интервала нужно указать GLOBK, данные с каких реперов использовать, а с каких — отбросить, если они вошли в другой интервал. Это — *проблема выбора интервалов комбинирования и распределения по ним наблюдений*.

Важно также то, что по разным причинам данные некоторых полевых наблюдений могут быть некачественными и их включение в вычислительную процедуру ухудшит все ее результаты. Если некачественные данные не были отброшены на этапе обработки в GAMIT, то их нужно отбросить на этапе GLOBK. Из glx-файлов при помощи программы glist из GAMIT/GLOBK можно получить сводный список наличия в них данных по реперам, а анализируя этот список — каталог наблюдений, обработанных в GAMIT. Этот каталог сверяется с каталогом из базы данных (БД) для поддержки ее актуальности и недопущения неоправданной потери данных. По той же причине следует отражать в БД исключения данных на этапе GLOBK. Это — *проблема актуальности БД*.

Исключение данных в обработке GLOBK не может происходить автоматически. Оператор обработки должен проводить их ревизию после каждого этапа, указывать в конфигурационных файлах, какие данные следует исключить, и перезапускать процесс обработки. Это — *проблема выбора исключаемых данных на этапе GLOBK*.

В ПК GLOBK не приведен оптимальный алгоритм решения обозначенных проблем, так как из-за универсальности и гибкости ПК единого оптимального алгоритма для всех вариантов его использования не существует. В руководстве оператора обработки имеются лишь общие методические указания, суть некоторых из них сформулирована в указанных проблемах. Первоначально составление конфигурационных файлов для каждого этапа обработки в Научной станции (НС) РАН осуществлялось вручную, как и выборка данных из БД и ее обновление. С накоплением объема данных трудоемкость такого подхода увеличивалась, и обозначенные проблемы не удавалось решить полностью, что приводило к ухудшению качества результатов обработки. Для решения этих задач в НС РАН разработан ПК SUR_GPS_GLOBK_PROCESSING, уменьшающий трудоемкость обработки GPS-данных на этапе GLOBK.

ПРОГРАММНЫЙ КОМПЛЕКС “SUR_GPS_GLOBK_PROCESSING”, АВТОМАТИЗИРУЮЩИЙ ОБРАБОТКУ ДАННЫХ В ПРОГРАММНОМ КОМПЛЕКСЕ GLOBK

Программный комплекс “SUR_GPS_GLOBK_PROCESSING” [9] реализован на языках Perl и bash-script и работает на платформе GNU/LINUX. Для описания его работы применены диаграммы потоков данных (DFD) [10]. На рис. 1 показана DFD первого уровня декомпозиции. Исходными данными для расчета являются glx-файлы, информация из БД и априорные координаты и скорости всемирных GPS-сетей, а в результате расчета получают скорости и временные ряды координат исследуемых реперов, а также обновления информации в БД.

На рис. 2 представлена декомпозиция процесса “Подготовка обработки в GLOBK”. В левой части DFD полупрозрачными стрелками показан замкнутый контур сопоставления каталогов наблюдений из БД и glx-файлов и внесения правок в БД. Это автоматизирует итерационное

решение проблемы актуальности БД. В правой части показаны замкнутые контуры, автоматизирующие итерационное решение проблемы выбора интервалов комбинирования и распределения по ним наблюдений. На рис. 3 изображена декомпозиция процесса “Осуществление обработки в GLOBK”, показаны замкнутые контуры, в которых оператор просматривает результаты расчета и итерационно решает проблему выбора исключаемых данных на этапе GLOBK.



Рис. 1. Диаграмма потоков данных программного комплекса “SUR_GPS_GLOBK_PROCESSING” первого уровня декомпозиции

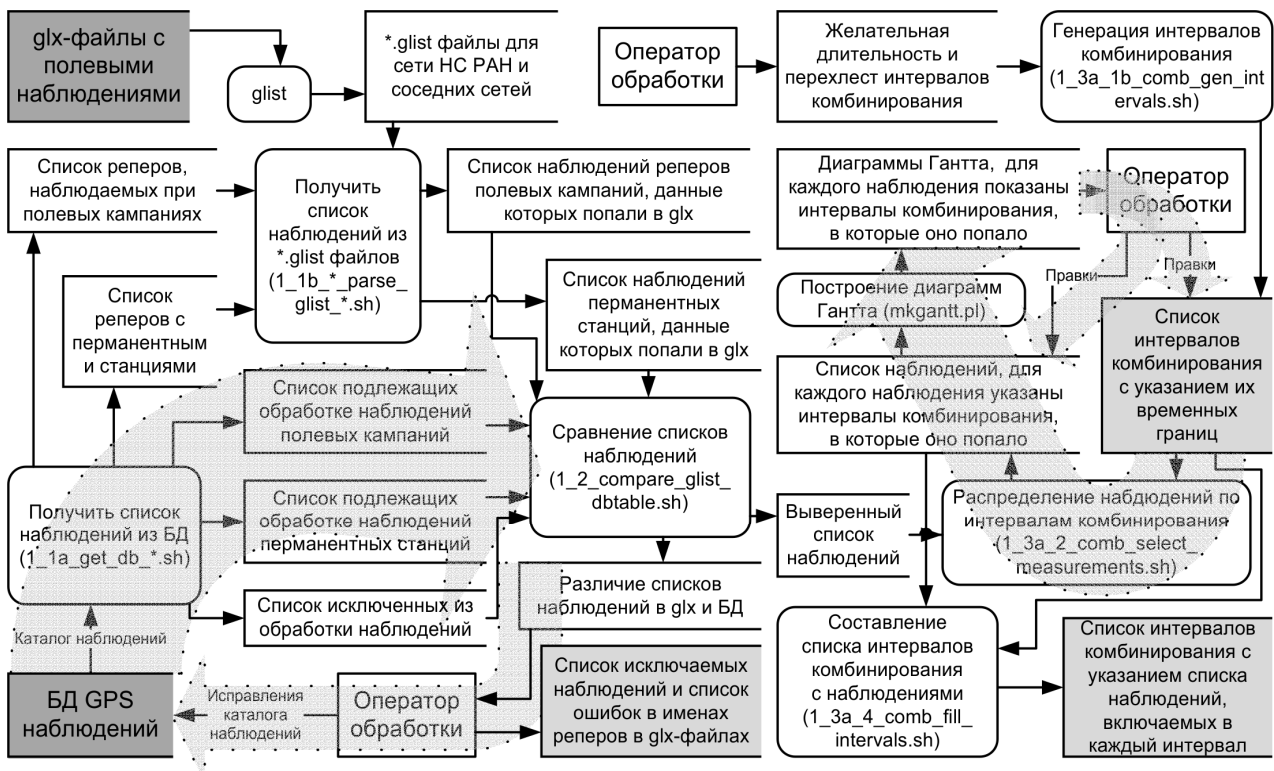


Рис. 2. DFD-декомпозиция процесса “Осуществление обработки в GLOBK”

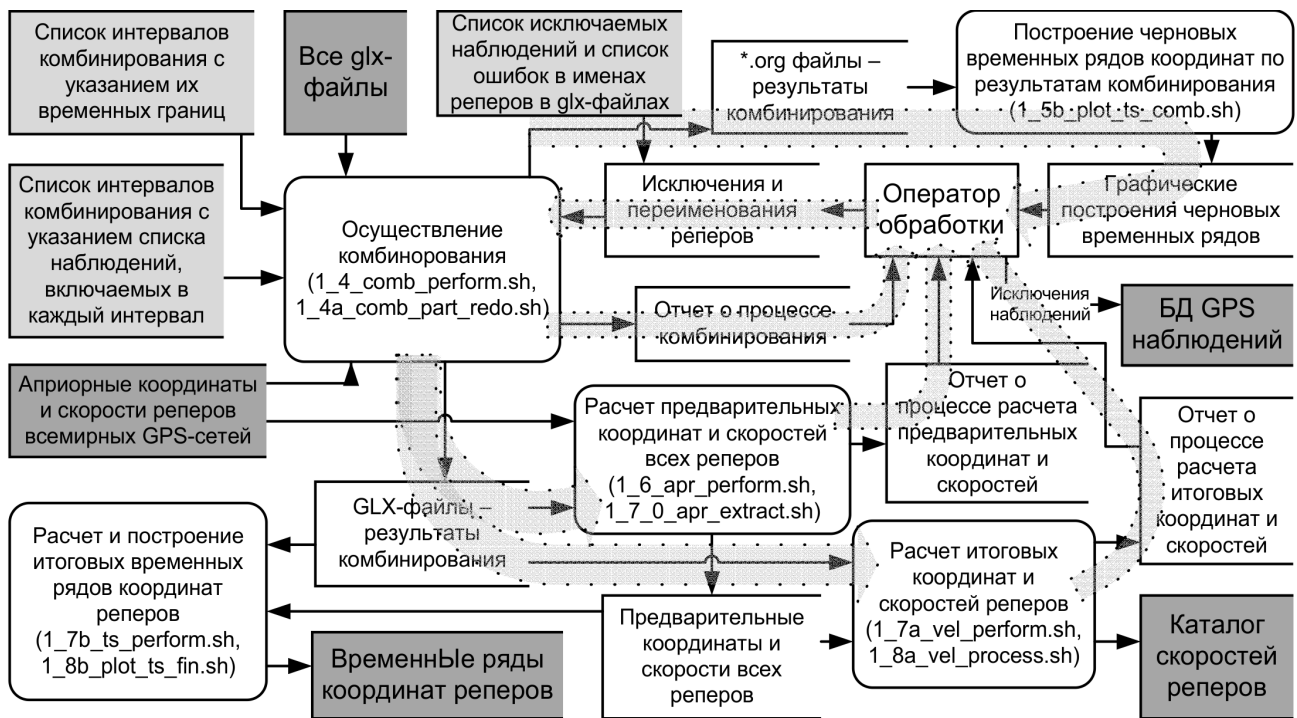


Рис. 3. DFD-декомпозиция процесса “Подготовка обработки в GLOBK”

К настоящему времени программный комплекс “SUR_GPS_GLOBK_PROCESSING” внедрен в ИС РАН для автоматизации обработки данных Центрально-Азиатской GPS-сети в ПК GLOBK. Примеры полученных результатов представлены на рис. 4 и 5. Рассчитанные с помощью “SUR_GPS_GLOBK_PROCESSING” каталоги скоростей GPS-реперов использованы во многих исследованиях геодинамики Тянь-Шаня и Памира, например [11 – 14].

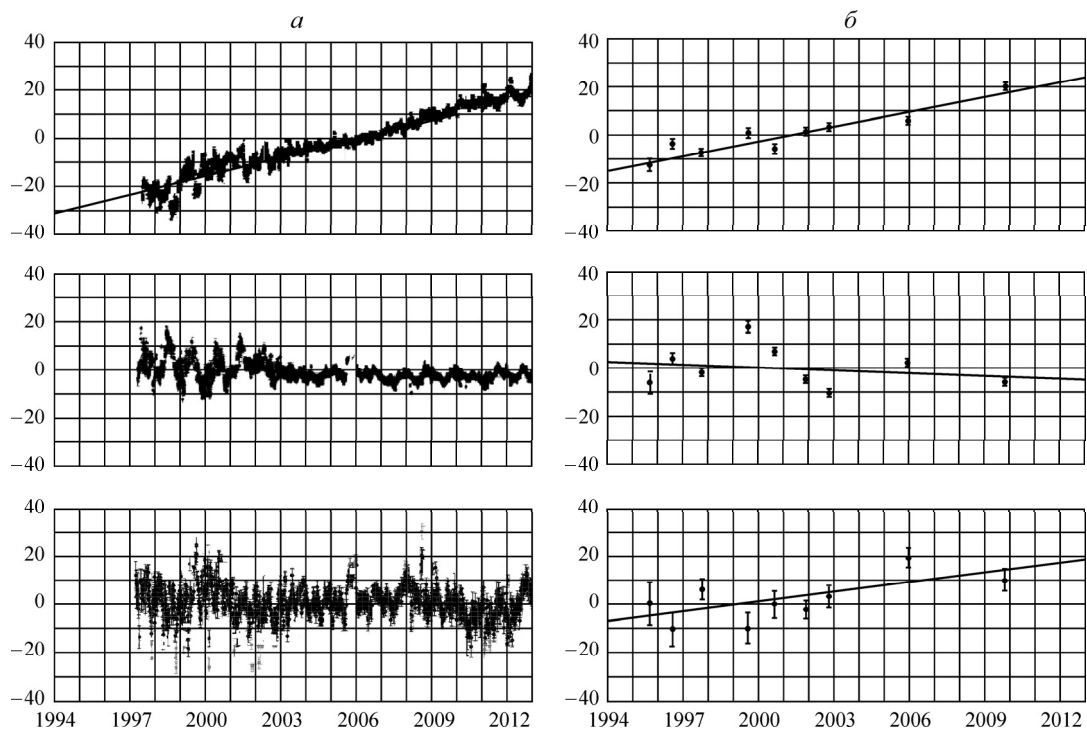


Рис. 4. Примеры графиков временных рядов координат, полученных при расчете в GLOBK с использованием программного комплекса “SUR_GPS_GLOBK_PROCESSING”: а — временные ряды трех координат (на север, восток и зенит) постоянно действующей GPS станции; б — те же ряды для репера, наблюдаемого в рамках полевых кампаний

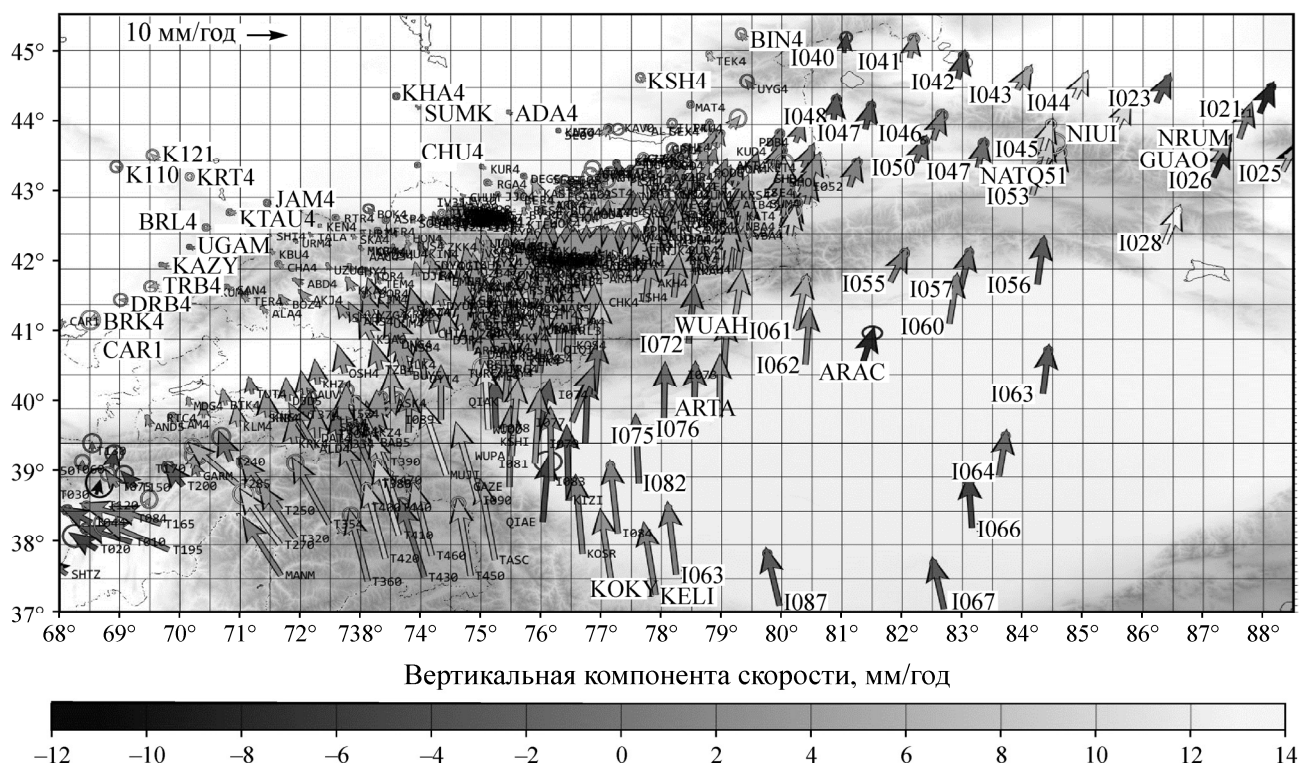


Рис. 5. Каталог скоростей геодезических реперов, полученный при расчете в GLOBK с использованием программного комплекса “SUR_GPS_GLOBK_PROCESSING”. Эллипсы на концах стрелок показывают 95 %-е доверительные интервалы

ВЫВОДЫ

Проанализирован подход к обработке данных наблюдений Центрально-Азиатской GPS-сети при помощи программного комплекса GAMIT/GLOBK, принятый в Научной станции РАН в Бишкеке (НС РАН). Выявлены проблемы, возникающие в процессе реализации этапа GLOBK этого подхода, увеличивающие трудоемкость обработки и препятствующие получению наилучшего возможного результата. Предложен алгоритм, позволяющий решить эти проблемы за счет итерационного повторения отдельных этапов обработки, и описан программный комплекс “SUR_GPS_GLOBK_PROCESSING”, предназначенный для наиболее полной автоматизации шагов этого алгоритма. Программный комплекс “SUR_GPS_GLOBK_PROCESSING” в настоящее время успешно используется в НС РАН. С его помощью подготовлен материал для различных геодинамических исследований.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ / REFERENCES

1. **Panzhin A. A., Sashurin A. D., Panzhina N. A., and Efremov E. Yu.** Organizing deformational monitoring of ground surface at Uzelgin and Talgan mines, *Gornaya Promyshlennost*, 2017, no. 5 (135), pp. 48–53. (in Russian) [Панжин А. А., Сашурин А. Д., Панжина Н. А., Ефремов Е. Ю. Организация деформационного мониторинга земной поверхности Узельгинского и Талганского месторождений // Горная промышленность. — 2017. — № 5 (135). — С. 48–53.]
2. **Kuzikov S. I. and Mukhamediev S. A.** Structure of the present-day velocity field of the crust in the area of Central-Asian GPS Network, *Izvestiya, Fizika Zemli*, 2010. vol. 46, no 7, pp. 584–601. doi:10.1134/S1069351310070037. [Кузиков С. И., Мухамедиев Ш. А. Структура поля современных скоростей земной коры в районе Центрально-Азиатской GPS-сети // Физика Земли. — 2010. — № 7. — С. 33–51.]
3. **Allmendinger R. W. and Reilinger R., Loveless J.** Strain and rotation rate from GPS in Tibet, Anatolia, and the Altiplano, *Tectonics*, 2007, vol. 26, no. 3, pp. TC3013. doi:10.1029/2006TC002030.

4. **Reilinger R., McClusky S., Vernant P. et al.** GPS constraints on continental deformation in the Africa-Arabia-Eurasia continental collision zone and implications for the dynamics of plate interactions, *Journal of Geophysical Research*, 2006, vol. 111, B05411. doi:10.1029/2005JB004051.
5. **Kreemer C., Blewitt G., and Klein E. C.** A geodetic plate motion and Global Strain Rate Model, *Geochemistry, Geophysics, Geosystems*, 2014, no. 15, pp. 3849–3889. doi:10.1002/2014GC005407.
6. **Herring T. A., King B. W., McClusky S. C.** Introduction to GAMIT/GLOBK Release 10.35, EAPS. MIT, 2009, 45 pp.
7. **Zubovich A. V.** Study of modern Earth crust movement velocities field in Central Tien Shan by space geodesy methods, Cand. Phys.-Math. Sci. Thesis, Moscow, 2001, 95 pp. (in Russian) [**Зубович А. В.** Изучение поля скоростей современных движений земной коры Центрального Тянь-Шаня методами космической геодезии: дис. ... канд. физ.-мат. наук. — М., 2001. — 125 с.]
8. **Grazhdankin A. M.** Information system for work with Central Asian GPS Network's data, Modern technology in research: Proceedings of V conference for young researchers and students, Bishkek, 2013, pp 45–50. (in Russian) [**Гражданкин, А. М.** Информационная система по работе с GPS-данными центрально-азиатской сети // Современные техника и технологии в научных исследованиях: материалы V конф. молодых ученых и студентов. — Бишкек, 2013. — С. 45–50.]
9. **Certificate** no. 2017663654. “SUR_GPS_GLOBK_PROCESSING” software for automating processing RS RAS's high precision GPS observation data using GLOBK software suite: software for computers, Mansurov A. N.; Research Station of RAS in Bishkek (RS RAS) (KG). [**Авт. свид. № 2017663654.** Программа для автоматизации обработки данных высокоточных GPS-наблюдений ИС РАН в программном комплексе GLOBK “SUR_GPS_GLOBK_PROCESSING”: программа для ЭВМ / А. Н. Мансуров, правообладатель Федеральное государственное бюджетное учреждение науки Научная станция Российской Академии Наук в г. Бишкеке (ИС РАН) (KG).]
10. **Kalyanov G. N.** Structural system analysis, Moscow, LORI, 1996, 242 pp. (in Russian) [**Калянов Г. Н.** Структурный системный анализ. — М.: Лори, 1996. — 242 с.]
11. **Mansurov A. N.** Distribution of earth crust's strain rate over North Tien-Shan computed by triangulating GPS-measurements' points' network, Modern tectonophysics: methods and results, Proceedings of fourth junior tectonophysical school-seminar, Moscow, IPE RAS, 2015, vol. 1. pp. 192–201. (in Russian) [**Мансуров А. Н.** Распределение скорости современной деформации земной коры северного Тянь-Шаня, полученное триангуляцией сети точек GPS наблюдений // Современная тектонофизика: методы и результаты: материалы IV молодежной тектонофиз. школы-семинара. Т. 1. — М.: ИФЗ, 2015. — С. 192–201.]
12. **Kuzikov S. I.** Modern movements of earth crust on various time-spatial levels at Central Asia, Problems of geo-dynamics and geo-ecology of inter-continent orogens, Proceedings of VI International symposium, Bishkek, 2015, pp. 72–78. (in Russian) [**Кузиков С. И.** Современные движения земной коры на различных пространственно-временных уровнях Центральной Азии // Проблемы геодинамики и геоэкологии внутриконтинентальных орогенов: материалы докладов VI Междунар. симп. — Бишкек, 2015. — С. 72–78.]
13. **Mansurov A. N.** A continuum model of present-day crustal deformation in the Pamir-Tien Shan region constrained by GPS data, *Geolog. Geofiz.*, vol. 58, no. 7, 2017, pp 787–802. DOI:10.1016/j.rgg.2017.06.002 [**Мансуров А. Н.** Непрерывная модель распределения современных деформаций Памиро-Тяньшаньского региона по данным GPS-наблюдений // Геология и геофизика. — 2017. — Т. 58. — № 7. — С. 986–1005.]
14. **Mansurov A. N.** Models, algorithms and software for investigating contemporary Earth's crust strain rate of Pamir-Tianshan region on space geodetic data: Cand. Tech. Sci. Thesis, Bishkek, 2018, 167 pp. (in Russian) [**Мансуров А. Н.** Модели, алгоритмы и программные средства для исследования современных деформаций земной коры Памиро-Тяньшаньского региона по данным космической геодезии: Дис канд. тех. наук. — Бишкек, 2018. — 167 с.]