

Наземно-космические методы исследования геодинамических процессов в земной коре

УДК 528.8; 530.31; 550.34; 624.13

**Ж. Ш. ЖАНТАЕВ, Б. К. КУРМАНОВ, А. Ж. БИБОСИНОВ,
К. А. САДЫКОВ, Т. ШАПИЫҚ, А. А. КАЛДЫБАЕВ**

ИЗУЧЕНИЕ СОВРЕМЕННЫХ ДВИЖЕНИЙ ЗЕМНОЙ КОРЫ ГОРОДА АЛМАТЫ МЕТОДАМИ КОСМИЧЕСКОЙ ГЕОДЕЗИИ

ДТОО «Институт Ионосфера», г. Алматы

В работе исследуются поля скорости современных движений земной поверхности по данным GNSS-измерений на примере территории города Алматы, описываются этапы построения локальной GNSS-сети для города Алматы, проведение измерений по пунктам сети, первичная обработка и интерпретация.

На протяжении длительного времени разнообразные деформации земной поверхности были и остаются источниками многочисленных и различных по масштабам разрушений окружающей среды и нарушений экологической обстановки, связанных с землетрясениями, оползнями, обвалами и другими воздействиями на приповерхностные геологические структуры. Применительно к территориям крупных городов такая ситуация резко обостряется из-за возрастающих нагрузок на грунт, связанных с массовыми многоэтажными застройками, интенсивного освоения подземного пространства, нарушений гидрорежима и вибровоздействий на геологическую среду со стороны быстро нарастающих транспортных потоков. В отдельных регионах крупных городов уровень воздействия на упомянутые геологические структуры уже приближается к критическому, при котором число разрушений из-за тех или иных деформаций земной поверхности резко возрастает [1, 2].

Среди многочисленных геологических, геофизических и геоморфологических методов изучения состояния геологической среды особое место занимают геодезические методы, позволяющие не только качественно, но и количественно оценить возникающие деформации земной поверхности и расположенных на ней различных строений и сооружений. Разработанные в последние годы подходы, основанные на высокоточных спутниковых методах координатных определений, открыли возможность организации эффективного геодезического мониторинга, позволяющего практически непрерывно и в самых разнообразных физико-географических условиях отслеживать те или иные деформации на миллиметровом уровне точности [1, 2].

Целью работы являются изучение полей скорости современных движений земной поверхности по данным GNSS-измерений на примере территории города Алматы, которые включают следующие этапы:

- построение локальной сети для города Алматы;
- проведение измерений по каждым пунктам сети;
- первичная обработка и интерпретация данных.

Изучение современных движений в городских условиях имеет целый ряд специфических особенностей. В их числе геологические условия наблюдений, доступность мест для размещения пунктов сети, и, наконец, характер действующих помех.

При построении сети наблюдений главным считалось обеспечение минимальной достаточности плотности пунктов и представительности сети на площади при известной схеме сети главных разломов фундамента и возможность расположения пунктов с точки зрения допустимого действия помех. Для этой цели проведена предварительная рекогносцировка всей территории города и его окрестности с одновременной оценкой соотношений сигнал/помеха с использованием переносимой измерительной установки приемник-антенна. Учитывалась также возможность размещения

пунктов в пределах блоков, ограниченных основными разрывными нарушениями, известными по данным ранее проведенных геолого-геофизических работ. Наиболее подходящей оказалась в этих условиях сеть со стохастическим распределением пунктов.

Исходя из известных геологических условий с учетом различных априорных данных, была составлена предварительная сеть наблюдений. Важным ее элементом является плотность сети пунктов. Этот параметр сети был предварительно выбран на основании опыта работ, ранее проводившихся по региональной Центрально-Азиатской сети, где плотность сети определялась исходя из размеров известных блоков коры и системы крупных разрывных нарушений региона. Для г. Алматы мы исходили из размеров блоковых структур фундамента, которые могут оказывать основное влияние на деформационные процессы поверхности в случае их взаимных относительных перемещений во время сильных землетрясений. При глубинах до фундамента порядка 3-х километров расстояния между ближайшими крупными разрывными нарушениями составляют от единиц до нескольких километров. Сеть разбита в пределах территории Алматы с незначительным выходом за ее пределы (рис. 1) и состоит из 14 пунктов наблюдений (табл. 1).

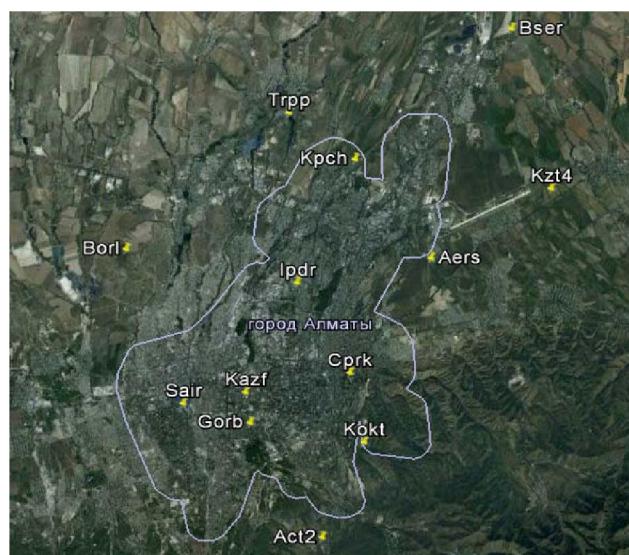


Рис. 1. Расположение пунктов локальной GPS-сети для города Алматы (табл. 1)

Таблица 1. Название и координаты пунктов локальной сети GPS-измерений для г. Алматы

№	Название пункта	Пункты	Координаты		
			Y	X	H, м
1	База	Baza	43°10'37.1850	76°57'4.0122	1209.896
2	Астрофизика	Act2	43°10'35.7349	76°57'58.5639	1316.425
3	Коктобе	Kokt	43°13'40.7683	76°59'06.7640	925.288
4	Аэропорт	Aers	43°19'38.9931	77°0'46.2605	639.803
5	Сайран	Sair	43°14'17.5640	76°51'54.7307	757.792
6	Кызылту-4	Kzt4	43°22'13.5082	77°5'5.0653	634.481
7	Капчагайская трасса	Kpch	43°22'30.8869	76°57'20.5690	614.688
8	Байсерке	Bser	43°27'8.1595	77°2'46.2691	573.468
9	Бурундайское кладбище	Borl	43°18'56.6571	76°48'56.5204	727.569
10	Первомайский пруд	Trpp	43°23'46.1461	76°54'32.1729	620.963
11	Ипподром	Ipdr	43°18'27.0849	76°55'42.3869	668.996
12	12-ая Горбольница	Gorb	43°13'54.3048	76°54'36.2963	791.633
13	Казахфильм	Kazf	43°14'50.4854	76°54'15.9350	927.644
14	Центральный парк	Cprk	43°15'47.3451	76°58'12.4722	743.061

Не имея возможности организовать синхронную сеть GPS-наблюдений в городе, пришлось ограничиться сериями последовательных наблюдений с использованием одной приемной станции. Измерения на каждом из пунктов проводятся периодически приемниками Lieca GRX 1200 GG Pro два раза в год. Принят регламент, при котором длительность регистрации сигналов спутников на одном пункте составляет 48 часов: с 14 часов местного времени до 14 через двое суток в непрерывном режиме с интервалом в 30 секунд. Т.е. за одну сессию (48 часов) отрабатывается один пункт наблюдений и производится 5720 независимых актов регистрации. Это дает возможность при последующей обработке увеличить соотношение сигнал/случайная помеха в корень квадратный из этого числа (примерно в 76 раз). Итог работы на пункте регистрируется в специальном рапорте, результаты регистрации заносятся на специальный носитель и передаются в центр обработки данных, где производится конвертирование данных в формат обработки и заносится в базу первичных данных. База первичных данных дублируется на внешний постоянный носитель и хранится независимо. Собственно переездом на очередной по графику пункт заканчивается отработка одного пункта за одну сессию наблюдений. В принимаемой информации содержатся все необходимые данные для определения координат приемника, но один, переданный пакет информации со спутников GNSS, отягощен различного рода помехами, которые могут быть в виде аддитивных (слагаемых) добавок, так и мультиплектируемых, которые обусловлены вариациями базовых параметров и проявляют себя в виде некоторого сомножителя к сигналу. Ослабление влияния этих принципиально различающихся помех осуществляется также различными способами. Основные аддитивные помехи представляют собой временные процессы со статистическими характеристиками, близкими к случайным сигналам. Известен общий способ их эффективного подавления путем накопления полезного сигнала. Для этого используют обычное многократное суммирование независимо принятых исходных сигналов, нормируемое на общее их число. В основе ослабления помех лежит предположение о неизменности полезного сигнала в процессе приема всех независимых актов приема. В этом случае полезная составляющая суммируется синхронно, а сигналы помех складываются хаотически. В результате энергия полезного сигнала увеличивается в N раз (пропорционально числу независимых актов регистрации). При случайной помехе выигрыш оказывается равным в корень квадратный из N раз. Эта возможность реализуется применяемой технологией приема и предопределяет режим или регламент, при котором осуществляется двухсуточный режим наблюдений на каждом пункте и независимый прием 5720 посылок сигналов. Способ эффективен, когда циклы помех меньше продолжительности непрерывной регистрации на пункте. Для ослабления помех с более длительными циклами приходится разносить во времени сессии. Одной из значимых помех является так называемая «годовая» с циклом около года. Ее можно ослабить лишь за несколько лет наблюдений. Поэтому и предполагается, что при работе с одной приемной станцией доступный для анализа результат может быть достигнут за время, более длительное по сравнению с продолжительностью темы. Есть и многие другие значимые помехи с циклами менее года. Они, в основном, обусловлены сезонностью. Поэтому принято считать необходимым вести наблюдения с количеством сессий более 3–5 в год.

Информация, получаемая с различных типов GPS-приемников, имеет разные форматы. Для использования этих данных совместно, ее сначала необходимо привести к единому виду. Одним из таких стандартных форматов является формат RINEX.

Основная обработка GPS-данных осуществлялась пакетом программ GAMIT/GLOBK, разработанным в Массачусетском Технологическом Институте США. Пакет GAMIT состоит из отдельных модулей, выполняющих функции подготовки данных для GPS-обработки, генерации таблиц интерполированных данных спутниковых орбит, вычисления разностных значений наблюдений, обнаружения отскоков и перерывов в данных, вычисления оценок параметров методом наименьших квадратов. Программы GAMIT для определения координат пунктов наблюдений используют измерения фаз несущих частот, дробные части которых регистрируются в GPS-приемниках с большой точностью.

В результате обработки получаются решения двух типов:

– первый тип решения – это оценки координат пунктов наблюдений и параметров спутниковых орбит и земного вращения. В этом решении используются жесткие ограничения на априорные координаты для хорошо изученных станций (до 2–3 мм) и свободные (до 100 м) для новых пунктов.

Данное решение может использоваться самостоятельно при определении координат пунктов наблюдений, но, в основном, оно применяется для контроля качества решения;

– второй тип решения в виде ковариационной матрицы используется для дальнейших расчетов в GLOBK. В этом решении применяются свободные ограничения на априорные значения для всех определяемых параметров.

Пакет GLOBK служит для подготовки и обработки данных на основе фильтра Кальмана. Одно из назначений данного пакета – это объединение отдельных сессий, например, однодневных решений для получения усредненных оценок координат пунктов наблюдений за период многодневного эксперимента. С помощью данного пакета также могут быть вычислены зависимости координат пунктов наблюдений во времени. В состав пакета включены различные программы постобработки и представления результатов [3].

При выполнении вычислений априорные значения координат и скоростей пунктов, априорные данные земного вращения и орбитальные данные образуют единый интегральный набор, который должен быть внутренне согласован. Наложение жестких ограничений на любой из этих параметров при региональном решении может деформировать систему. Для того чтобы этого не произошло, ограничения на априорные координаты пунктов, скорости, параметры спутниковых орбит и вращения Земли при решении не должны быть жесткими.

Вместе с тем такое решение из-за большой свободы может сместить или развернуть всю систему станций и/или их векторы скоростей их движений. Стабилизация позволяет определить систему отсчета с помощью минимизации отклонений значений, полученных в результате решения, от априорных координат и/или скоростей для набора хорошо определенных станций. Итерационная схема стабилизации автоматически исключает пункты, для которых координаты имеют большие отклонения.

Поле скоростей данного региона показаны на рис. 2, а их значение приведены в табл. 2.

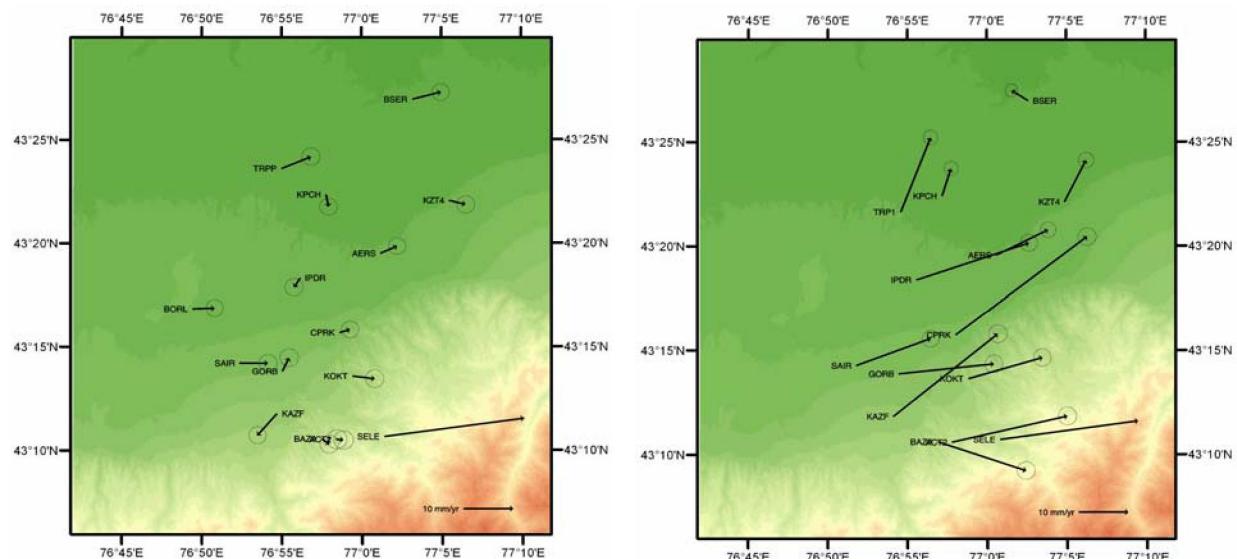


Рис. 2. Скорости городской сети GPS-измерений за 2011 г.
Скорости относительно Евразийского континента (слева) и относительно центра земли (справа)

Таким образом, перманентная станция SELE, входящая в мировую сеть IGS, имеет ошибку порядка 0,1 мм/год, когда остальные временные пункты не отличаются высокой точностью измерений. Это указывает на необходимость разработки специальных мер по снижению погрешности на станциях городской сети до порядка 1–2 мм/год.

Проведенные впервые исследования на территории г. Алматы по разработке технологии изучения современных движений земной поверхности с использованием GNSS-наблюдений высокой точности показали, что в пределах урбанизированных территорий такие работы вполне возможны и необходимы. Основное преимущество работ с использованием такой системы – возможность получения одновременно параметров скоростей по трем взаимноортогональным составляющим, характеризующимися значительными вариациями в течение года.

Таблица 2. Данные первичной обработки на всех пунктах городской и глобальной сети GPS-измерений (2011 г.)

Долгота	Широта	Запад-Восток, мм/год	Юг-Север, мм/год	Вертикальн., мм/год	Идент. пункта
120,98739	24,79799	-4,18	-2,07	0,92	TCMS_GPS
107,05233	47,86507	2,46	-4,25	2,03	ULAB_GPS
104,31624	52,21902	1,45	0,34	-1,42	IRKT_GPS
104,31618	52,21902	0,41	0,13	1,09	IRKJ_GPS
91,10403	29,65733	15,72	17,49	-4,4	LHAZ_GPS
87,60067	43,80795	3,4	7,99	0,39	URUM_GPS
87,17731	43,47111	4,49	7,55	11,9	GUAO_GPS
83,23545	54,84061	-11,75	10,58	-21,49	NVSK_GPS
82,90949	55,0305	-0,4	-0,4	11,44	NOVM_GPS
78,55087	17,41726	10,53	38,17	-1,24	HYDE_GPS
78,40838	43,0568	1,61	5,39	-2,03	SATY_GPS
78,37318	43,52911	1,19	2,15	6,13	CHLK_GPS
77,63341	43,30894	0,27	6,69	15,11	TURG_GPS
77,57038	13,02117	12,63	39,86	-3,22	IISC_GPS
77,0169	43,17873	-0,74	2,78	0,66	SELE_GPS*
76,99759	43,85393	1,1	-3,05	-8,67	CHSH_GPS
76,94381	43,04197	2,31	-7,92	6,94	TSHN_GPS
76,79557	43,22949	2,39	-3,95	10,09	NKAM_GPS
76,61011	43,03757	-0,4	1,79	3,76	IZVS_GPS
76,42687	43,12999	-0,88	0,69	3,07	MATB_GPS
76,33846	43,89349	-0,05	-0,78	4,12	KURY_GPS
75,96739	43,04487	-0,09	0,65	3,12	KAST_GPS
74,7511	42,9985	0,85	0,8	1,2	CHUM_GPS*
74,69427	42,67977	-2,91	2,51	1,96	POL2_GPS*
73,99711	44,20813	-1,04	-1,36	-1,51	SUMK_GPS
73,94351	41,38494	-0,28	8,87	-7,1	KAZA_GPS
72,21045	42,44547	-1,09	-0,75	4,71	TALA_GPS
66,88545	39,13477	3,75	3,23	-16,02	KIT3_GPS
58,56046	56,42982	-3,16	3,18	17,81	ARTU_GPS
51,33409	35,69728	-0,07	12,03	5,15	TEHN_GPS
51,28094	43,54623	2,76	1,87	0,48	KASP_GPS
44,50293	40,22646	0,02	10	-10,05	NSSP_GPS
41,56507	43,78839	-0,82	-0,87	10,86	ZECK_GPS
36,23901	50,0051	-3,58	-1,34	9,51	KHAR_GPS
34,54293	49,60261	-4,59	-4,17	5,42	POLV_GPS
33,99098	44,41326	-5,34	-2,8	3,41	CRAO_GPS
13,06609	52,3793	-5,14	-6,22	-12,32	POTS_GPS

Ошибка, вероятнее всего, обусловлена малым числом независимых наблюдений на временных пунктах, что обусловлено невозможностью организовать непрерывные наблюдения из-за отсутствия приемных устройств и плохой обеспеченности отряда транспортными средствами.

Установлены основные требования к системам наблюдений и инженерному оборудованию наземных пунктов наблюдений, а также разработаны и опробованы оригинальные технические решения пунктов, допускающие их строительство в городских условиях на основе долговременной базовой конструкции, погружаемой в грунт и съемных элементов с блоком оборудования и антенным держателем.

За два года наблюдений на городской территории установлены признаки значительных смещений точек поверхности. Сделан вывод о необходимости ведения синхронных наблюдений на части пунктов, с последующим перемещением приемников на другие пункты с перекрытием систем наблюдений.

Для обеспечения высокого качества первичной обработки данных мониторинга необходим выбор с последующим контролем качества данных группы близких непрерывных станций мировой сети (IGS).

Для производственных или опытно-производственных мониторинговых работ необходимо создать специализированную группу профессионально подготовленных сотрудников для ведения полевых работ, первичной обработки данных, группу интерпретации и анализа.

Работа выполнена по РБП 002 «Прикладные научные исследования в области космической деятельности» в рамках темы «Разработать методы оценки геомеханического состояния земной коры кризисных территорий с использованием математического моделирования и спутниковых технологий».

ЛИТЕРАТУРА

1 Зубович А.В., Трапезников Ю.А., Брагин В.Д., Мосиенко О.И., Щелочков Г.Г., Рыбин А.К., Баталев В.Ю. Поле деформации, глубинное строение земной коры и пространственное распределение сейсмичности Тянь-Шаня // Геология и геофизика. – 2001. – Т. 42, № 10. – С. 1634-1640.

2 Zubovich A.V., Wang X.-q., Scherba Y.G., Schelochkov G.G., Reilinger R., Reigber C., Mosienko O.I., Molnar P., Michajlow W., Makarov V.I., Li J., Kuzikov S.I., Herring T.A., Hamburger M.W., Hager B.H., Dang Y.-m., Bragin V.D., Beisenbaev R.T. GPS velocity field for the Tien Shan and surrounding regions // Tectonics. – 2010. – V. 29. – TC6014, doi:10.1029/2010TC002772.

3 <http://www-gpsg.mit.edu/~simon/gtgk/>

*Ж. Ш. Жантайев, Б. К. Құрманов, А. Ж. Бибосынов,
К. А. Садықов, Т. Шапық, А. А. Қалдыбаев*

АЛМАТЫ ҚАЛАСЫНЫҢ ҚАЗІРГІ ЖЕР ҚЫРТЫСЫНЫҢ ҚОЗҒАЛЫСТАРЫН ФАРЫШТАҚ ГЕОДЕЗИЯ ӘДІСТЕРИМЕН ЗЕРТТЕУ

Бұл жобада Алматы қаласы аумағының мысалында GNSS-өлшемдері деректері арқылы жер бетінің қазіргі қозғалысы жылдамдығының һрістері зерттеледі, Алматы қаласына арналған жергілікті GNSS-желісі құрылышының кезеңдері желіс пункттері өлшемдерінің бастапқы өндөу және түсіндірме беруі баяндалады.

*Zh. Sh. Zhantayev, B. K. Kurmanov, A. Zh. Bibosinov,
K. A. Sadikov, T. Shapiy, A. A. Kaldibayev*

THE STUDY OF MODERN CRUSTAL MOVEMENTS ALMATY CITY BY SPACE GEODESY METHODS

We investigate the velocity field of the modern movements of the earth surface according to the GNSS-measurements by the example of the city Almaty, describes the stages of building a local GNSS-network for the city Almaty, measuring the points of the network, primary processing and interpretation.