

**ДВИЖЕНИЯ И ДЕФОРМАЦИИ ЛИТОСФЕРНЫХ ПЛИТ ПО ДАННЫМ
КОСМИЧЕСКОЙ ГЕОДЕЗИИ (К ВОПРОСУ О ФИКСАЦИИ КИНЕМАТИЧЕСКОЙ
СИСТЕМЫ КООРДИНАТ)**

М.Д. Герасименко**, *Минору Касахара**

**Институт прикладной математики ДВО РАН, г. Владивосток*

***Институт сейсмологии и вулканологии Хоккайдского университета, г. Саппоро, Япония*

Цель настоящей работы – исследование нового алгоритма фиксации трехмерной кинематической референционной системы координат для определения движений и деформаций литосферных плит по данным космической геодезии. Алгоритм основан на использовании только вертикальных составляющих скоростей движений пунктов, получаемых только по геодезической информации, т.е. полностью свободен от влияния какой-либо геолого-геофизической модели. По сути он дает ту же не связанную с движением и вращением литосферных плит систему координат, что и известная модель тектоники плит NNR NUVEL-1A, основанная на геологической информации, к которой привязана последняя версия международной системы координат ITRF97 и ее более ранние модификации. Для исследования алгоритма использовано последнее опубликованное NASA глобальное VLBI решение номер 1122, июнь 1999. В обработку взято 400 базисных векторов, соединяющих 59 геодезических пунктов. Сравнение статистических характеристик разностей скоростей движений пунктов нашего решения, решения ITRF97 и NNR NUVEL-1A показало, что по отношению к модели NNR NUVEL-1A исследуемый алгоритм по своим свойствам не уступает методике, принятой при реализации ITRF97. Во-вторых, представленное решение и решение ITRF97 значительно ближе друг к другу, чем к геологической модели NNR NUVEL-1A, к которой привязано решение ITRF97. Таким образом, впервые показана реальная возможность использования только геодезической информации для независимой проверки качества как геофизических моделей, так и используемой в мировой практике международной земной референционной системы координат ITRF. Дополнительно в работе определено возможное изменение радиуса Земли, равное примерно $(-0,3 \pm 0,1)$ мм/год, что в пределах точности совпадает с другими наиболее достоверными определениями этой величины.

Ключевые слова: тектоника плит, система координат, космическая геодезия

ВВЕДЕНИЕ

Важность и трудность фиксации трехмерной кинематической системы координат (KRF) для определения движений и деформаций литосферных плит по данным космической геодезии общеизвестна. Вполне очевидно, что такая система координат должна быть независима от каких-либо априорно принятых геофизических моделей, так как именно по скоростям движений геодезических пунктов на земной поверхности, определенных независимо от геофизических предположений, можно адекватно оценить качество той или иной геофизической модели эволюции Земли в целом или ее отдельных компонент. К таким геофизическим моделям можно отнести общеизвестные модели движений жестких лито-

сферных плит NUVEL-1 и NUVEL-1A [5], модели послеледниковой отдачи земной коры типа ICE-4G [16], глобальной модели перераспределения масс внутри Земли, движений центра масс и другие. Скорости движений пунктов земной поверхности используются в тектонофизике, сейсмологии, гляциологии, гидрологии, геологии и других науках о Земле для изучения тех или иных геофизических явлений. Ясно, что точность и надежность независимо определенных геодезических параметров должна соответствовать и даже превышать надежность определения исследуемых геофизических характеристик. Вместе с тем, обычно наблюдается довольно парадоксальная ситуация, когда параметры движений и деформаций земной поверхности, определяемые по

данным космических геодезических систем VLBI (Very Long Baseline Interferometry), SLR (Satellite Laser Ranging), GPS (Global Positioning System) и DORIS (Doppler Orbit Determination and Radiopositioning Integrated by Satellite), вычисляются в системе координат, тем или иным образом привязанной к геологическим моделям типа NUVEL-1 или NUVEL-1A. А поскольку любая модель содержит в себе неизбежные ошибки, происходящие от исходных геофизических измерений и гипотез, то эти ошибки неизбежно в той или иной мере повлияют на результаты геодезических определений. Это, во-первых. А, во-вторых, главная цель, для которой обычно используются геодезические определения скоростей движений пунктов, – это обычно верификация собственно геофизической модели, построенной, как правило, исходя из той или иной гипотезы. В результате получается, что мы проверяем геофизическую модель по данным, которые в той или иной степени уже привязаны к самой модели.

Не являются исключением из описанной ситуации и системы координат, одинаково принятые при реализации международных земных референцных систем ITRF96 и ITRF97 (International Terrestrial Reference Frame). ITRF96, по утверждению [18], полностью свободна от какой-либо модели тектоники плит и геологических предположений. Но недостаток приведенных в статье [18] данных не позволяет нам утверждать, что это действительно полностью так. Тем более, что в работе [6] утверждается со ссылкой на работы [7, 8], т.е. тех же авторов, что и статья [18], что скорости движений пунктов в ITRF определены минимизацией разностей скоростей наблюдаемых и модели NNR NUVEL-1A. Что ITRF основана на NNR NUVEL-1A утверждает также Такахаси [19]. Системы координат ITRF96 и ITRF97 зафиксированы таким же образом [14], как и ITRF94. В работе [7] также указано, что временная эволюция ITRF94 следует геофизической модели NNR NUVEL-1A.

Результатом такого определения системы координат является внесение в нее собственно ошибок NNR NUVEL-1A и разности между движением плит в последние годы, т.е. годами накопления информации космическими геодезическими системами, и за последние 3 миллиона лет, по данным которых построена модель NNR NUVEL-1A. Между тем, именно в этой системе координат многие исследователи определяют движение пунктов, используя GPS измерения [6]. Кроме того, параметры орбит спутников IGS (International GPS Service) определяются именно в ITRF [6, 9]. Исходя из сказанного, следует подчеркнуть, что вопрос фиксации кинематической системы

координат геодезическими методами имеет не только теоретическое, но, может быть, в большей степени даже практическое значение.

Еще один важный вопрос, ответ на который не дается практически ни в одной известной публикации, связанной с реализацией той или иной системы координат, – это вопрос численной устойчивости получаемых решений. Складывается впечатление, что авторы реализации той или иной системы координат пользуются или каким-то стандартным, хорошо отработанным и абсолютно надежным методом решения систем уравнений, или же, попросту говоря, не обращают внимания на влияние ошибок округлений и вопросы численной устойчивости решения уравнений. На последнюю мысль наталкивает тот факт, что мы не обнаружили даже упоминания об анализе численной устойчивости решения или предпринимаемых мерах по его стабилизации. В то же время, в большинстве работ, причем очень больших по объему, часто даются подробнейшие объяснения очевидных выводов и эффектов, которые, вдобавок, иллюстрируются элементарными рисунками в расчете на совершенно не знакомого с рассматриваемым явлением читателя. Вопросы же численной устойчивости и, в конечном счете, надежности окончательных результатов своей работы авторами или сознательно замалчиваются, или же они не догадываются об их существовании.

Между тем наша практика реализации KRF показала, что вопросам устойчивости численного решения следует уделять первостепенное значение даже в случае обработки небольших геодезических сетей. В противном случае мы рискуем получить результат, не имеющий ничего общего с действительностью. Причем выявить плохую устойчивость решения, а значит и ненадежность окончательных результатов, – задача не тривиальная, особенно в случае обработки достаточно обширной сети, какой является, например, ITRF96, содержащая [18] 521 станцию в 290 пунктах, а общее число определяемых неизвестных из решения равно 3895.

ITRF97 реализована позже ITRF96, поэтому объем информации, используемый для ее создания, естественно, больше.

Ряд вопросов встает и при добавлении в ковариационную матрицу уравненных геодезических координат или скоростей не вполне объясненных дополнительных сдвигов [6, 9, 13 и др.]. Такое изменение ковариационных матриц в конечном счете повышает собственные значения этих матриц и, при правильном выборе добавки, улучшает их обусловленность. По сути дела такая процедура используется при решении плохо обусловленных систем линейных

уравнений методом регуляризации. Некоторые, хотя не вполне четкие и строгие, пояснения в этом контексте содержатся в статье [9], где она применена именно для улучшения обусловленности почти сингулярной системы нормальных уравнений. В других случаях некоторые авторы, использующие эту процедуру, похоже и не догадываются, что по сути это элементарная регуляризация решения, и называют ее уточнением ошибок исходной информации, учетом систематических ошибок и т.п. Такое внесение дополнительных ошибок в стохастическую модель делается ими для того (см, например, [6, 13]), чтобы ошибка единицы веса σ_0 из уравнивания была приближенно равна 1. Мы не исключаем вероятность того, что большое отклонение σ_0 от 1 при уравнивании без введения в стохастическую модель дополнительных ошибок может объясняться именно недостаточной численной устойчивостью применяемого этими авторами алгоритма, плохой обусловленностью решаемых ими систем уравнений.

Обращает на себя внимание и еще один факт. Практически во всех работах, связанных с фиксацией KRF по космическим измерениям, не упоминается теория уравнивания и фиксации системы координат на основе аппарата обобщенно обратных (g-обратных) матриц, хотя в той или иной мере она обычно используется неявно в виде задания соответствующих ограничений на положение начала и ориентации системы координат. Попутно отметим, что эта матрица ограничений формируется явно из чисел 0, 1 и приближенных координат пунктов земной поверхности, участвующих в фиксации системы координат, т.е. ее элементы чрезвычайно разнятся по абсолютной величине. Любопытно отметить, что ни в одной из известных нам работ по установлению KRF даже не упоминается, что до начала решения системы уравнений эта матрица ограничений предварительно должна быть соответствующим образом отмасштабирована. В противном случае окончательный результат будет, как правило, весьма далек от реальности из-за плохой обусловленности системы уравнений, а ошибки округлений при решении практически могут полностью поглотить полезную информацию. Теоретическое объяснение и практические рекомендации по устранению этого явления можно найти в работах [2, 3]. Отметим здесь же, что ни в одной из известных нам публикаций других авторов за последние 30–40 лет, посвященных свободному уравниванию геодезических сетей, это явление нигде не упоминается и, соответственно, не дается никаких рекомендаций по борьбе с ним. Может быть именно поэтому интерес к свободному уравниванию в последние годы существенно понизился? А вместо него стали применять в большинстве случаев наложение ог-

раничений на минимальное число параметров сети, соответствующее числу степеней свободы? Других объяснений в голову не приходит, а какие-либо убедительные объяснения в литературе отсутствуют.

Между тем мы не видим альтернативы применению теории свободного уравнивания, основанной на аппарате обобщенно-обратных матриц, при решении задачи фиксации KRF без привлечения какой-либо геолого-геофизической модели. К сожалению, и она не лишена недостатков в ее классической формулировке. И главная трудность ее применения состоит в том, что пункты на земной поверхности, во-первых, распределены неравномерно: большинство VLBI пунктов расположено лишь в Северной Америке и Европе, т.е. на двух литосферных плитах. Во-вторых, и это может быть наиболее серьезно влияющим на стабильность фактором, сами плиты и скорости их движений весьма различаются по величине, что общеизвестно. Поэтому при фиксации или привязке к некоторому среднему значению скоростей плит, что физически и происходит при классической формулировке задачи свободного уравнивания, все решение оказывается смещенным на эту величину, которая, к тому же, оказывается неизвестной.

Эти отрицательные эффекты применения классической теории аппарата обобщенно обратных матриц в геодезии достаточно хорошо видны на примерах обработки космических геодезических сетей, приведенных в ранних работах Герасименко [10, 11]. Они, похоже, преодолены в последних опубликованных работах [1, 12], в которых классические ограничения на сдвиг системы координат путем минимизации суммы скоростей по координатам заменены минимизацией лишь вертикальных составляющих этих скоростей, которые, как сейчас хорошо установлено, в среднем на порядок меньше горизонтальных составляющих. Исследованию этого алгоритма в большей степени и посвящена данная работа.

Вполне естественно, что не все из высказанных выше замечаний или положений беспорны. Но игнорирование или замалчивание накопившихся в данной области вопросов просто недопустимо, поскольку только их разрешение, по нашему мнению, способно в дальнейшем повысить точность и надежность геодезических данных. Современные космические измерительные технологии и накопление измерительной информации это обеспечивают.

А повышение надежности геодезических данных, как отмечалось выше, окажет влияние на существенный прогресс в деле исследования Земли как планеты в целом. В практическом плане для использования спутниковых глобальных навигационных систем типа GPS и GLONASS их разрешение также крайне необходимо.

ИСХОДНЫЕ ДАННЫЕ И АЛГОРИТМ ВЫЧИСЛЕНИЙ

В качестве исходной информации для установления системы KRF и вычисления трехмерных скоростей движений пунктов земной поверхности нами использовано последнее опубликованное NASA глобальное VLBI решение (NASA Goddard Space Flight Center's VLBI terrestrial reference frame solution number 1122, 1999 June), доступное любому пользователю Internet [15]. В обработку взяты все три компонента (продольная, поперечная и псевдо-вертикальная) скоростей изменений 400 базисных векторов, соединяющих 59 пунктов геодезической сети VLBI. В сеть включены лишь пункты, имеющие наиболее длительную историю наблюдений и наибольшее число взаимных связей. Отметим также,

что некоторые пункты (KASHIM34 и KASHIMA, NRAO 140 и NRAO20, OV-VLBA и OVRO 130) по сути совпадают, но наблюдения в них отнесены к различным физическим точкам в пространстве и времени по техническим причинам, в связи с чем они использованы при обработке независимо как отдельные станции, поэтому в результате решения имеют свои собственные скорости движений. В решении ITRF97 для этих пунктов, а также HAYSTACK и WESTFORD, отыскиваются одинаковые скорости движений, что с физической точки зрения не совсем корректно. Результаты ITRF97 для VLBI пунктов доступны по адресу http://lager.ensg.ign.fr/ITRF/ITRF97/results/ITRF97_VLBI.SSC. Этот файл содержит координаты, скорости и их средние квадратические ошибки в прямоугольной системе координат X, Y, Z. Отсутствие полной ковариационной

Таблица 1. Скорости и их средние квадратические ошибки квазистабильных VLBI пунктов (мм/год).

Номер и название станции	VLBI решение S2001						NUVEL-1A		Решение ITRF97		
	dB	S_{dB}	dL	S_{dL}	dH	S_{dH}	dB	dL	dB	dL	dH
7282 ALGOPARK	4.1	0.3	-18.2	0.2	3.5	0.3	3.2	-17.3	-0.2	16.5	0.9
7614 BR-VLBA	-8.3	0.3	-15.5	0.3	-3.6	0.4	-12.9	-15.1	-12.3	-12.2	-5.0
7332 CRIMEA	12.3	0.4	25.0	0.6	3.0	1.2	9.1	23.9	9.6	23.6	0.5
1515 DSS15	-3.2	0.5	-20.4	0.0	0.6	0.7	-12.0	-12.4	-6.8	-15.9	0.8
1545 DSS45	55.8	0.4	17.9	0.3	0.5	0.6	54.0	17.8	52.5	19.7	0.2
1565 DSS65	16.9	0.3	18.8	0.3	1.7	0.4	15.4	18.3	14.6	19.1	1.5
7613 FD-VLBA	-3.9	0.3	-14.4	0.2	0.5	0.4	-7.2	-12.1	-8.8	-11.7	1.2
7297 FORTLEZA	14.0	0.3	-6.4	0.3	-0.3	0.3	11.5	-5.4	9.9	-4.1	1.8
7225 GILCREEK	-21.1	0.3	-11.1	0.2	2.8	0.2	-20.5	-10.5	-23.8	-8.3	0.0
7232 HARTRAO	17.4	0.3	17.2	0.3	-2.5	0.4	19.8	20.4	16.9	18.5	2.7
7218 HATCREEK	-5.4	0.4	-22.1	0.3	2.6	0.9	-13.5	-13.2	-10.5	-19.0	0.4
7205 HAYSTACK	7.5	0.4	-16.7	0.3	-0.5	0.6	5.8	-16.0	3.1	-15.3	-1.3
7618 HN-VLBA	7.7	0.4	-15.7	0.3	-0.5	0.6	5.7	-16.1	2.5	-14.6	-2.7
7242 HOBART26	56.5	0.3	14.0	0.3	-0.3	0.4	54.7	12.9	53.0	15.4	1.5
1856 KASHIMA	-10.6	0.2	-4.9	0.3	-0.6	0.3	-15.5	18.7	-13.2	-1.5	-4.8
1311 KAUAI	36.5	0.3	-65.6	0.3	1.7	0.4	32.3	-58.2	31.2	-61.1	0.8
7298 KOKEE	35.1	0.3	-64.9	0.3	1.2	0.3	32.3	-58.2	31.2	-61.1	0.8
7610 KP-VLBA	-6.2	0.3	-15.1	0.3	-1.0	0.5	-10.1	-12.0	-10.7	-12.2	-1.0
7611 LA-VLBA	-4.3	0.3	-15.9	0.2	-1.7	0.3	-8.1	-13.6	-8.9	-13.1	-1.7
7243 MATERA	19.6	0.2	23.7	0.3	-0.3	0.3	12.5	21.6	17.4	23.5	-0.4
7230 MEDICINA	18.4	0.2	22.4	0.3	-1.7	0.3	13.4	20.4	15.3	23.1	-4.0
7617 MK-VLBA	34.4	0.3	-66.1	0.3	-2.6	0.4	32.1	-58.4	31.3	-61.6	-1.9
7222 MOJAVE12	-1.6	0.3	-19.0	0.2	-0.8	0.3	-12.0	-12.4	-6.8	-15.9	-0.8
7612 NL-VLBA	1.4	0.3	-17.1	0.2	-3.6	0.5	-2.3	-16.2	-3.9	-14.9	-3.7
7547 NOTO	20.2	0.3	21.8	0.3	-1.0	0.4	20.2	19.5	17.7	22.0	-0.3
7204 NRAO 140	4.3	0.4	-16.8	0.3	0.0	1.1	2.5	-15.2	0.2	-14.5	-2.0
7208 NRAO20	5.6	0.3	-16.3	0.3	3.5	0.5	2.5	-15.2	0.2	-14.5	-2.0
7616 OV-VLBA	-3.5	0.3	-21.3	0.3	-3.4	0.5	-12.5	-12.7	-7.8	-18.0	-3.9
7207 OVRO 130	-1.9	0.4	-21.3	0.4	-2.1	1.0	-12.5	-12.7	-7.8	-18.0	-3.9
7234 PIETOWN	-6.3	0.3	-16.1	0.2	0.6	0.3	-8.8	-13.0	-10.9	-12.9	0.7
7219 RICHMOND	3.9	0.3	-12.2	0.2	-1.5	0.4	2.3	-10.9	0.1	-9.9	2.9
1404 SANTIA12	19.4	0.5	16.7	0.4	3.7	0.8	9.3	-0.9	13.4	18.0	7.9
7227 SESHAN25	-13.8	0.3	31.1	0.3	1.0	0.6	-13.0	21.8	-15.8	33.6	-1.6
7223 VNDNBERG	25.5	0.4	-44.1	0.3	3.2	1.0	24.0	-40.1	19.6	-41.5	0.4
7209 WESTFORD	7.3	0.3	-16.9	0.2	-0.3	0.2	5.8	-16.0	3.1	-15.3	-1.3
7224 WETTZELL	15.9	0.2	20.6	0.3	-0.3	0.3	13.2	20.0	13.4	20.2	-2.2

Таблица 2. Скорости и их средние квадратические ошибки мобильных VLBI пунктов (мм/год).

Номер и название станции	VLBI решение S2001						NUVEL-1A		Решение ITRF97		
	dB	S_{dB}	dL	S_{dL}	dH	S_{dH}	dB	dL	dB	dL	dH
7203 EFLSBERG	16.0	0.3	19.8	0.3	5.9	0.7	14.1	18.6	13.9	18.9	-1.4
7266 FORT ORD	25.5	1.4	-42.2	1.1	6.1	6.6	24.4	-38.4	21.5	-41.2	12.2
7108 GGAO7108	4.6	0.6	-16.5	0.6	-2.6	2.7	3.7	-15.2	1.4	-14.5	-0.2
7263 JPL MV1	10.4	1.1	-39.5	0.9	6.8	6.1	23.1	-39.9	8.6	-34.3	-2.0
1857 KASHIM34	-10.8	0.4	-4.7	0.4	-6.7	0.9	-15.5	18.7	-13.2	-1.5	-4.8
7278 KODIAK	-15.2	1.1	-16.4	1.1	-0.2	5.4	-21.4	-8.4	-15.7	-14.1	3.2
4968 KWJAL26	27.6	1.5	-73.8	1.2	-2.2	3.8	28.0	-65.2	23.8	-69.9	-6.2
7274 MON PEAK	16.2	0.7	-46.3	0.6	-4.5	3.0	22.4	-40.8	15.6	-39.0	1.8
7331 NYALES20	14.8	0.2	11.8	0.3	6.2	0.4	13.3	12.7	14.1	10.0	0.5
7245 OHIGGINS	9.8	1.2	11.4	1.1	4.9	2.8	22.5	12.5	9.1	15.2	13.3
7213 ONSALA60	15.1	0.2	17.9	0.3	4.3	0.3	13.3	18.3	13.2	17.2	1.5
7256 PINFLATS	7.9	0.8	-32.1	0.7	-4.8	6.3	22.4	-40.1	3.1	-28.2	2.2
7258 PLATTVIL	-6.3	0.6	-17.7	0.6	3.9	3.1	-7.5	-15.0	-8.6	-14.1	-2.2
7252 PRESIDIO	12.3	0.8	-34.2	0.8	-11.0	4.1	-13.9	-12.3	8.0	-31.2	-8.4
7251 PT REYES	22.8	0.7	-38.3	0.6	7.7	3.3	24.9	-37.3	17.2	-35.1	14.5
7221 QUINCY	-4.0	0.6	-24.5	0.6	4.7	3.6	-13.4	-13.0	-8.2	-20.3	0.6
7615 SC-VLBA	15.3	0.4	9.0	0.3	4.6	0.7	10.1	3.8	10.1	10.3	3.2
7280 SNDPOINT	-18.6	1.7	-12.0	1.3	-22.5	6.6	-22.5	-5.7	-23.3	-12.4	-0.6
7602 TROMSONO	14.5	1.4	28.6	1.0	9.7	5.0	12.1	16.9	14.9	12.9	-0.2
7330 URUMQI	4.9	1.3	30.7	2.3	-10.1	4.3	-5.4	24.8	6.6	30.1	-0.2
7333 YEBES	16.2	0.7	16.1	0.6	-16.1	2.2	15.3	18.5	12.8	19.7	-4.8
7296 YLOW7296	-9.4	0.4	-19.6	0.3	6.2	0.7	-11.1	-18.6	-12.9	-16.3	4.2
7894 YUMA	-7.1	1.2	-15.6	1.1	16.4	7.1	-11.0	-12.0	-12.0	-12.1	16.3

матрицы координат пунктов, к сожалению, не позволяет по этим данным оценить точность топосцентрических подвижек, т.е. по широте В, долготе L и высоте Н, хотя вычислить сами подвижки dB, dL и dH не представляет сложности. Краткое описание решения ITRF97 содержится в [14].

Наше решение, для краткости обозначенное S2001, представлено для квазистабильных пунктов в табл. 1 и мобильных в табл. 2. При решении использован алгоритм, описанный в работах [1] и [12]. При этом приняты в учет все рекомендации по обеспечению устойчивости решения, обоснованные в работах [2, 3]. Решение системы нормальных уравнений с ограничениями на вертикальные составляющие подвижек квазистабильных пунктов выполнено методом спектрального разложения матриц по собственным значениям и векторам при помощи [4] хорошо известных процедур tred2 и tq12.

Во избежание какого-либо случайного влияния геолого-геофизической модели на систему отсчета отбор квазистабильных пунктов выполнялся строго по формальному признаку: поскольку современная точность определения скоростей движений VLBI пунктов лежит обычно в пределах 1–2 мм/год, пункт считался квазистабильным, если ошибка определения его скорости по высоте не превосходила $\sigma_{dH}^0 = 2$ мм/год, а сама подвижка по

модулю была $|dH| \leq 2\sigma_{dH}^0 = 4$ мм/год. Возможны, естественно, и другие численные критерии, но вариация величины $|dH|$ в пределах от 1 мм/год до 5 мм/год, как показали эксперименты, приводит к изменению скоростей подвижек лишь в пределах 1мм/год и даже менее, что можно считать не выходящими за пределы точности определения.

При реализации S2001 не накладывалось каких-либо дополнительных ограничений на ориентацию системы координат, поскольку эта информация уже содержится в исходных измеренных поперечных и псевдовертикальных составляющих изменений базисных линий, т.е. при фиксации системы координат накладывались лишь ограничения на ее трансляцию.

О надежности полученного решения позволяет судить, например, тот факт, что некоторые измеренные скорости изменений базисных линий в решении NASA [15] имели нулевые ошибки. Это, как известно, при уравнивании использованным нами параметрическим способом теоретически приводит к вырожденности системы нормальных уравнений. Замена нами нулевых ошибок на значения 0,01 мм/год (практически это нулевые ошибки) дала спектральное число обусловленности нормальной системы 693000, т.е. система уравнений осталась практически вырожденной для примененного нами метода реше-

ния. Увеличение ошибок до 0,1 мм/год привело к уменьшению обусловленности до 37000, что уже практически приемлемо [2]. Эти решения были получены при использовании ограничений на вариации высот квазистабильных пунктов в пределах $|dH| < 2$ мм/год, в результате чего общее число квазистабильных пунктов равнялось всего 24. Сравнение же двух решений показало, что они практически идентичны: все топоцентрические подвижки, например, оказались равными с точностью до 0,05 мм/год за исключением вертикальных составляющих пунктов SNDPOINT и TROMSONO, для которых различия составили 0,11 и 0,16 мм/год, соответственно, при точности их определения 6,6 и 5,0 мм/год.

СРАВНИТЕЛЬНЫЙ АНАЛИЗ РЕШЕНИЙ

Сравнение статистических характеристик скоростей движений пунктов, полученных из различных решений и моделей, позволяет выявить качество того или иного решения. Подобное сравнение для решений GSFC93, GSFC95, ITRF93, ITRF94, ITRF96 и моделей NUVEL-1 и NUVEL-1A приведено, например, в работе [19] с целью исследования деформаций литосферных плит вблизи их границ. Здесь мы по сути приводим аналогичный анализ только для сравнения качества решений S2001, ITRF97, введя в рассмотрение дополнительные статистические характеристики распределений: эксцесс и скошенность, которые характеризуют остро (плоско)вершинность и асимметрию распределения [17]. Статистические характеристики вычислены по разностям скоростей движений идентичных пунктов и их средним квадратическим ошибкам для составляющих движений по прямоугольным координатам X, Y, Z и геодезическим координатам B, L, H. Отметим, что для решения ITRF97 ошибки топоцентрических скоростей отсутствуют, как указывалось выше, поэтому вычисленные подвижки для этой системы координат считались равноточными, что в некоторой степени искажает результаты. Результаты наших вычислений для всех пунктов сети представлены в табл. 3, по данным которой видно, что независимое по отношению к модели NNR NUVEL-1A решение S2001 по качеству в среднем незначительно уступает решению ITRF97, привязанному к этой модели.

Несколько иная картина наблюдается для разностей скоростей, полученных из решений S2001 и ITRF97. В целом, во-первых, из последнего столбца табл. 3 следует, что наши результаты и результаты ITRF97 ближе друг к другу, чем к модели NNR NUVEL-1A. Особенно хорошо это видно на численных значениях эксцесса и скошенности, которые пренебрегаемы по сравнению с ошибками их определе-

ния 1,28 и 0,5 соответственно. Но взвешенное среднее, которое характеризует сдвиг системы координат, показывает, что S2001 и ITRF97 сдвинуты друг относительно друга на значительно большую величину чем ITRF97 сдвинута относительно модели. По величинам взвешенного среднего видно, что фактически начало отсчета модели NNR NUVEL-1A лежит между началами S2001 и ITRF97, причем ITRF97 уклоняется от NNR NUVEL-1A существенно меньше, что обусловлено ее специальной привязкой к этой модели. Теоретически при одинаковом наборе непосредственной измерительной информации разность уклонений S2001 и ITRF97 относительно NNR NUVEL-1A должна равняться разности S2001 и ITRF97, поэтому наблюдающееся в табл. 3 сравнительно небольшое расхождение от этого правила легко объясняется именно различием в исходной информации, использованной для реализации S2001 и ITRF97. Кроме того, S2001 использует только VLBI информацию, в то время как для реализации ITRF97 дополнительно взяты в учет данные SLR, GPS и DORIS, что, как нам представляется, в целом должно было бы более существенно повысить точность ITRF97 по отношению к NNR NUVEL-1A. Тем более, что ITRF97 к этой модели привязана.

Можно было бы ожидать, что эти характеристики окажутся значительно лучше, если их вычислить только для квазистабильных пунктов. На самом деле они оказались в большинстве меньше лишь на несколько процентов от приведенных в табл. 3, поэтому здесь не приводятся.

Более детальный анализ показал, что некоторые уклонения решений S2001 и ITRF97 от модели NNR NUVEL-1A существенно превосходят их средние квадратические уклонения. Поэтому, отбрасывая (опять по формальному признаку) информацию для пунктов KASHIMA и SANTIA12, для которых эти уклонения превосходят утроенное среднее квадратическое уклонение, аналогичные табл. 3 характеристики были подсчитаны для остальных квазистабильных пунктов (табл. 4).

Сравнение данных табл. 4 и табл. 3 показывает, что характеристики расхождений решений S2001 и ITRF97 практически не изменились, и это естественно. По сравнению же с моделью NNR NUVEL-1A почти все характеристики, кроме взвешенных средних, существенно уменьшились. Эксцесс и скошенность уменьшились до величин, которые позволяют считать их несущественными, т.е. распределение уклонений не отличается от гауссовского. Из сказанного следует вывод, что движения пунктов, лежащих вблизи границ литосферных плит (а именно к ним относятся KASHIMA и SANTIA12) значи-

Таблица 3. Статистические характеристики разностей решений S2001, ITRF97 и модели NNR NUVEL-1A для всех VLBI пунктов.

	S2001 – NUVEL-1A		ITRF97 – NUVEL-1A		S2001 – ITRF97
	X,Y,Z	B,L,H	X,Y,Z	B,L,H	X,Y,Z
СКО (мм/год)	4.54	4.55	3.99	5.65	1.94
	4.97	6.26	3.89	6.27	2.81
	3.59	2.41	2.66	4.61	4.03
Взвешенное среднее (мм/год)	-0.88	3.06	0.23	-0.69	-1.48
	2.32	-2.41	0.54	-0.53	1.84
	2.74	0.40	-1.06	0.35	3.77
Эксцесс $\sigma = 1,28$	11.18	0.53	5.70	5.22	0.36
	6.44	6.27	3.42	3.84	0.16
	0.42	0.62	0.29	3.45	-0.65
Скошенность $\sigma = 0.50$	2.94	0.40	1.86	0.32	0.21
	2.05	-1.49	1.49	-0.73	0.59
	0.61	0.75	0.34	1.64	-0.01

Таблица 4. Статистические характеристики разностей решений S2001, ITRF и модели NNR NUVEL-1A для квазистабильных VLBI пунктов (пункты KASHIMA и SANTIА12 опущены).

	S2001 – NUVEL-1A		ITRF97 – NUVEL-1A		S2001 – ITRF97
	X,Y,Z	B,L,H	X,Y,Z	B,L,H	X,Y,Z
СКО(мм/год)	2.67	4.28	2.24	2.77	1.90
	4.03	4.05	2.69	3.16	2.67
	3.18	1.84	2.37	2.09	3.90
Взвешенное среднее (мм/год)	-1.98	3.16	-0.42	-0.56	-1.67
	2.06	-2.03	0.37	0.08	1.80
	2.42	0.03	-1.23	-0.74	3.70
Эксцесс $\sigma = 1.68$	0.66	0.35	1.59	-0.13	-0.03
	-0.17	0.33	-0.10	3.75	-0.73
	1.77	0.72	0.70	-0.58	0.33
Скошенность $\sigma = 0.66$	-0.26	0.80	-0.93	1.02	0.05
	0.51	0.08	0.29	0.94	-0.24
	0.97	0.70	1.01	-0.25	0.62

тельно отличаются от движений соответствующих жестких плит, предсказываемых геофизической моделью. Данный вывод в целом подтверждает опубликованные ранее исследования [19] и других авторов, что литосферные плиты испытывают существенные деформации вблизи их границ (в пределах 300–500 км).

Сравнение средних квадратических ошибок скоростей движений пунктов S2001 и аналогичного решения [12] показывает, что точность S2001 существенно выше. Причинами этого является большая продолжительность наблюдений во времени и большее количество измеренных базисных линий (400 вместо 340). Несущественное увеличение ошибок отдельных компонент скоростей на некоторых пунктах объясняется уменьшением количества их

связей с другими пунктами из-за изменения геометрии сети: в решении S2001 использован несколько иной набор VLBI пунктов.

Аналогично работе [10], по двум методикам нами сделана оценка возможного изменения радиуса Земли. Это изменение получилось равным $(-0,27 \pm 0,08)$ мм/год и $(-0,29 \pm 0,12)$ мм/год, т.е. такая тесная сходимость результатов по двум методикам свидетельствует о корректности фиксации KRF. Само значение изменения радиуса Земли сравнимо с ошибками его определения и в пределах точности практически совпадает с аналогичным предыдущим определением [12] и определениями других авторов. Иначе говоря, какого-либо существенного и измеримого на современном уровне достигнутой точности изменения размеров Земли не наблюдается, поэтому пришло время покончить со всякими спекуляциями в этом отношении, утверждающими об уменьшении радиуса Земли до 10 мм/год и даже более. О значительном расширении Земли на современном этапе также речи быть не может.

До сих пор в литературе встречаются также споры о большем соответствии геодезических данных геологическим моделям NUVEL-1A или NUVEL-1.

Нами подсчитаны аналогичные табл.3 характеристики уклонений решений S2001и ITRF97 относительно модели NNR NUVEL-1, представленные в табл. 5. Сравнение данных табл. 3 и табл. 5 показывает, что по средним квадратическим отклонениям решение S2001 несколько ближе к NUVEL-1, в то время как ITRF97 – к NUVEL-1A. В целом же отдать предпочтение той или иной модели на основе всех приведенных здесь характеристик пока не представляется возможным.

Таблица 5. Статистические характеристики разностей решений S2001, ITRF97 и модели NNR NUVEL-1 для всех VLBI пунктов.

	S2001 – NUVEL-1		ITRF97 – NUVEL-1	
	X,Y,Z	B,L,H	X,Y,Z	B,L,H
СКО (мм/год)	4.44	4.58	4.06	6.10
	4.77	6.03	3.98	6.33
	3.54	2.41	2.94	4.61
Взвешенное среднее (мм/год)	-0.18	2.74	0.95	-0.97
	1.81	-2.08	0.15	-0.14
	2.48	0.40	-1.25	0.35
Эксцесс $\sigma = 1.28$	12.45	0.39	5.62	4.47
	8.40	8.81	4.12	4.28
	0.74	0.62	0.31	3.45
Скошенность $\sigma = 0.50$	3.12	0.47	1.88	0.29
	2.26	-1.97	1.65	-0.90
	0.68	0.75	0.40	1.64

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

1. Алгоритм фиксации трехмерной референционной системы координат путем минимизации суммы вертикальных составляющих скоростей движений пунктов космических геодезических сетей по своим свойствам не уступает методике, принятой при реализации ITRF97.

2. Решения S2001 и ITRF97 значительно ближе друг к другу, чем к геофизической модели NNR NUVEL-1A.

3. Вычисленное по VLBI данным изменение радиуса Земли равно $\sim (-0.3 \pm 0.1)$ мм/год, т.е. сопоставимо с точностью его определения. Во всяком случае, полученный результат убедительно подтверждает ранее сделанные выводы, что возможное изменение радиуса Земли существенно меньше 1 мм/год, поэтому пришло время полностью покончить со всякими дискуссиями о возможности его изменения в пределах сантиметров.

4. Учитывая, что алгоритм, принятый при реализации S2001, полностью свободен от влияния какой-либо геолого-геофизической модели, он имеет несомненные преимущества перед другими алгоритмами с точки зрения изучения глобальных геофизических процессов. Приведенные в данной работе скорости движения пунктов следует считать лишь как пример, иллюстрирующий использованный алгоритм, так как все результаты могут быть улучшены путем привлечения в совместную обработку всех измерений, включая VLBI, SLR, GPS, DORIS, а также традиционную геодезическую информацию о локальных движениях пунктов земной поверхности, как это сделано при реализации ITRF.

БЛАГОДАРНОСТЬ

Один из авторов этой работы (М.Д. Герасименко) выражает искреннюю благодарность Институту сейсмологии и вулканологии Хоккайдского университета (г. Саппоро, Япония) за представленную возможность завершить данное исследование во время его пребывания в Хоккайдском университете.

ЛИТЕРАТУРА

- Герасименко М.Д. Алгоритм фиксации трехмерной кинематической системы отсчета для изучения движений литосферных плит по геодезическим данным // Геодезия и картография. 1998. № 8. С. 27–34.
- Герасименко М.Д. Оптимальное проектирование и уравнивание геодезических сетей. М.: Наука, 1992. 160 с.
- Герасименко М.Д. Современный метод наименьших квадратов с геодезическими приложениями. Владивосток: Дальнаука, 1998. 100 с.
- Уилкинсон, Райнш. Справочник алгоритмов на языке АЛГОЛ. Линейная алгебра. М.: Машиностроение, 1976. 389 с.
- Argus D.F., Gordon R.G. No-net-rotation model of current plate velocities incorporating plate motion model NUVEL-1 // Geophys. Res. Lett. 1991. V. 18. P. 2039–2042.
- Argus D.F., Peltier W.R., Watkins M.M. Glacial isostatic adjustment observed using very long baseline interferometry and satellite laser ranging geodesy // J. Geophys. Res. 1999. V. 104, N B12. P. 29077–29093.
- Boucher C., Altamini Z., Feissel M., Sillard P. Results and Analysis of the ITRF94 // IERS Tech. Note 20. Int. Earth Rotation Serv. Paris, 1996. P. 1–13.
- Boucher C., Altamini Z., Sillard P. Results and Analysis of the ITRF96 // IERS Tech. Note 24. Int. Earth Rotation Serv. Paris, 1998. P. 1–13.
- Davies P., Blewitt G. Methodology for global geodetic time series estimation: A new tool for geodynamics // J. Geophys. Res. 2000. V. 105, N B5. P. 11083–11100.
- Gerasimenko M.D. A few geodetic arguments in favour of hypothesis of expanding Earth // Far Eastern Mathematical Reports. 1997. N 3. P. 69–79.
- Gerasimenko M.D. Modelling of the change of Earth dimensions and deformations from space tracking data // Proc. of the CRCM'93, Kobe, Dec. 6–11, 1993. Special Issue of the J. Geod. Soc Jap. Kyoto, 1994. P. 215–217.
- Gerasimenko M.D., Kato T. Establishment of a three-dimensional kinematic reference frame by space geodetic measurements // Earth, Planets and Space. 2000. N 52. P. 959–963.
- Heki K. Horizontal and vertical crustal movements from a three-dimensional very long baseline interferometry kinematic reference frame: Implication for the reversal timescale revision // J. Geophys. Res. 1996. V. 101. N B2. P. 3187–3198.
- ITRF97, <http://lager.ensg.ign.fr/ITRF/ITRF97/itrf97-in/itrf97-in.html>.
- NASA Goddard Space Flight Center VLBI Group, 1999. Data products available electronically at <http://lupus.gsfc.nasa.gov/global>.
- Peltier W.R. VLBI baseline variations from the ICE-4G model of postglacial rebound // Geophys. Res. Lett. 1995. V. 22. P. 465–468.
- Press W.H., Teukolsky S.A., Vetterling W.T., Flannery B.P. Numerical Recipes in C: the art of scientific computing. Cambridge University Press. New York, Oakleigh, 1992. 994 p.
- Sillard P., Altamini Z., Boucher C. The ITRF96 realization and its associated velocity field // Geophys. Res. Lett. 1998. V. 25. P. 3223–3226.
- Takahashi Y. Differences of station velocities obtained by GSFC and IERS from those predicted by the nnr-NUVEL1A model and crustal deformation near plate boundaries // J. Geod. Soc Jap. 1999. V. 45, N 1. P. 9–29.

M. D. Gerasimenko, and Minoru Kasahara

Tectonic plate motion and deformation by space geodesy measurements (on the question of fixing kinematics reference frame).

The purpose of this research is investigation of a new algorithm for fixing the three-dimensional kinematics reference frame of space geodetic stations in which only vertical components of quasi-stable site velocities for every X, Y, Z direction are used. This kinematic reference frame does not depend upon any geological plate model and thus is free from the errors coming from the uncertainties of such a model. On the contrary, it is possible to verify such plate model as NNR NUVEL-1A using only geodetic information itself. The algorithm has been applied to the VLBI data (NASA GSFC VLBI terrestrial reference frame solution number 1122, June, 1999). We have used for the analysis the estimated rate of change of 400 baseline vectors between 59 VLBI sites. We have found fairly close agreement between our solution and international terrestrial reference frame solution ITRF97. That is the KRF can be fixed exclusively using space based measurement itself. Our solution almost does not yield ITRF97 solution in respect of NNR NUVEL-1A plate model. It is despite of the fact that ITRF97 network coverage the largest set of globally distributed VLBI, SLR, DORIS and GPS terrestrial space geodesy stations. In addition, we have found that the most likely change of the Earth's radius is near $-0,3$ mm/yr with estimated error $0,1$ mm/yr that is in good agreement with reliably established determinations of this value.