

Е. В. Гливенко^{1, 2}, А. С. Фомочкина^{1, 3}, Д. А. Трифонова¹

¹ ФГАОУ ВО «РГУ нефти и газа (НИУ) им. И. М. Губкина», ² АО «Научно-исследовательский институт вычислительных комплексов им. М. А. Карцева», ³ ФГБУН «Институт теории прогноза землетрясений и математической геофизики РАН»

ИССЛЕДОВАНИЕ СТЕПЕНИ ОТОБРАЖЕНИЯ, СООТВЕТСТВУЮЩЕГО ДВИЖЕНИЮ ЗЕМНОЙ КОРЫ

В статье рассматривается векторное поле, которое характеризует движение земной коры. Данное движение фиксируется с помощью различных современных методов и рассматривается как преобразование, для которого можно вычислить степень отображения. В начале статьи дается описание различных систем координат и методов фиксации. Затем приведено описание таблиц, в которые заносятся координаты и их изменения во времени. По этим данным для некоторых регионов может быть построена таблица углов и вычислена степень отображения. Результаты вычислений позволяют сделать выводы о наличии неподвижных точек векторного поля внутри рассматриваемой области. Такие точки свидетельствуют о накоплении в данной области напряжения в горных породах, которое в дальнейшем может привести к разрыву – землетрясению.

Ключевые слова: векторное поле, международные системы координат, сейсмическая активность

Введение

Верхней частью земной поверхности является литосфера, которая, в свою очередь, делится на ряд плит, называемых литосферными. Ниже располагается твердая верхняя часть мантии. Эти геосферы состоят из различных горных пород, обладающих высокой твердостью. Но ниже, в толще твердой мантии, находится менее вязкий слой, называемый астеносферным. Предполагается, что астеносфера является подобием «смазки», по которой перемещаются литосферные плиты [1].

Считается, что литосфера разделена на восемь крупных литосферных плит, несколько десятков средних по размеру и множество мелких. Во время перемещения плиты могут сталкиваться друг с другом, образуя гористые комплексы и, напротив, могут расходиться друг от друга, раскалываясь с образованием водоемов. Эти взаимодействия плит являются источником огромного напряжения в горных породах, сжимают их или растягивают. После превышения предела прочности горной породы возникает очень быстрое ее смещение – разрыв, который приводит к землетрясению.

Скорость распространения таких разрывов может достигать нескольких километров в секунду. Эти преобразования земной коры охватывают некоторый объем пород, называемый очагом землетрясения. В центре очага находится гипоцентр, а проекция этого центра на земную поверхность – эпицентр землетрясения. Сейсмическая активность

в основном сосредоточена на границах литосферных плит.

Международные системы координат

Итак, в земной коре происходит множество меняющихся и формирующих ее процессов. Если зафиксировать координаты некоторых опорных точек, расположенных на земной поверхности, и отслеживать изменения этих координат в течение времени, можно сделать выводы о тектонике плит, оседании или поднятии земной поверхности, а также судить об изменении вращения Земли в пространстве.

Оценкой параметров вращения и координат Земли занимается IERS (International Earth Rotation and Reference Systems Service) – Международная служба вращения Земли, которая отвечает за контроль всемирного времени, а также стандартной земной (International Terrestrial Reference System, ITRS) и небесной (International Celestial Reference System, ICRS) систем координат. Рассмотрим их подробнее.

Международная небесная система координат – это привязанная к звездным объектам система координат, относительно которой измеряется вращение Земли. Началом координат в ней является барицентр (центр масс, или среднее арифметическое всех точек с учетом локальной плотности или удельного веса) Солнечной системы. Эта система координат независима от движения Земли, что повышает точность астрономических измерений. Оси

системы фиксированы относительно квазаров – особых объектов Вселенной, которые считаются наиболее далекими объектами, с огромной скоростью удаляющимися от нашей галактики.

Международная земная система координат принята Международным астрономическим союзом в 1991 году. Началом отсчета данной системы является центр масс Земли. Она вращается вместе с Землей, являясь геоцентрической и неинерциальной. В этой системе координат составляется информация о движении спутников. Интересно, что ее ось x лежит в плоскости опорного меридиана (IERS Reference Meridian, IRM), который является нулевым (0° долготы) и проходит примерно в 102 метрах к востоку от Гринвичского меридиана. Измерение координат производится с помощью различных космических спутниковых систем (ГЛОНАСС, GPS и т.д.). Единица измерения длины – метр. Стабильность положения осей ITRS обеспечивается за счет того, что тектоническое движение коры не учитывается.

Эталонной же на сегодняшний день является система ITRF (International Terrestrial Reference Frame) [2] – реализация земной системы с помощью декартовых координат. Система ITRF определяется положениями опорных станций, координаты которых на земной поверхности постоянны, если не учитывать тектоническое движение плит. Для точного вычисления координат сети расположенных по всей планете базовых станций используются данные, полученные сразу несколькими геодезическими методами.

Один из таких методов – DORIS (Doppler Orbitography and Radiopositioning Integrated on Satellite) – система радиопозиционирования и определения орбиты путем измерения доплеровского сдвига частоты. Ее принцип работы заключается в том, что радиомаяки наземного базирования излучают сигнал, который принимают находящиеся на орбите спутники. Траектория движения спутников определяется сетью наземных станций. Далее определяются координаты этих станций-маяков. Но точное расположение спутника невозможно определить мгновенно из-за частотного сдвига, обусловленного воздействием на спутник и на сигнал от него во время движения в космическом пространстве. Траектория перемещения спутника рассчитывается благодаря специальному алгоритму, учитывающему различия между математической моделью и информацией о полученных координатах. Точность вычислений зависит от времени измерений. Когда достаточно высокая точность достигнута, система может вычислить местоположение маяка, находящегося вне наземных систем и требующего мониторинга (вулканы, ледники) [3].

Другая система, называемая SLR (Satellite Laser Ranging), измеряет временной интервал,

необходимый для передачи импульса от лазерного передатчика до спутника и обратно. Получается, что расстояние между источником сигнала и приемником приблизительно равно измеренному времени, умноженному на скорость света [4].

Принцип работы метода РСДБ, или VLBI (радиоинтерферометрия со сверхбольшими базами, Very Long Baseline Interferometry), заключается в том, что космические объекты наблюдаются по единой программе с нескольких приемников (радиотелескопов), расположенных на очень большом расстоянии друг от друга (от десятков до тысяч километров). Данные с каждого приемника записываются на носители информации и коррелируются между собой особыми алгоритмами. Смысл состоит в том, что система телескопов имитирует один большой телескоп, размер которого измеряется расстоянием между самыми далекими телескопами данной системы [5].

И одним из самых известных методов является GNSS (Global Navigation Satellite Systems), который на данный момент реализуется такими спутниковыми системами, как ГЛОНАСС, GPS, и некоторыми другими. Принцип работы спутниковой системы заключается в том, что измеряются расстояния от источника сигнала, координаты которого необходимо узнать, до спутников, координаты которых известны с высокой точностью. Координаты источника сигнала вычисляются приемником на основе информации о координатах спутников и времени их отправки, так как скорость сигнала известна.

Итак, данные от всех этих систем поступают в Международную службу вращения Земли, и раз в несколько лет она публикует результаты измерений, представленные в виде ITRF-таблиц, которые предлагается использовать при вычислении степени отображения.

Структуры файла ITRF

На рисунке приведен пример ITRF-таблицы. Нас интересуют следующие данные:

- Domes nb. – первый столбец в файле, являющийся идентификационным номером станции. Первые три его цифры указывают на область/страну (например, 100 соответствует Франции), следующие две – на номер региона страны (например, 02 – Грасс), буква указывает точку отслеживания, а три последующие цифры обозначают порядковый номер точки (GPS-столб);
- X/Vx , Y/Vy , Z/Vz – координаты станций и скорости их движений вдоль координатных линий.

Применение степени отображения

Таким образом, имеются данные о поверхности Земли, которые представляют собой векторное поле, или, другими словами, преобразование или

DOMES NB.	SITE NAME	TECH. ID.	X/Vx	Y/Vy	Z/Vz	Sigmas			SOLN	DATA_START	DATA_END
			-----m/m/y-----								
10002S001	Grasse (OCA)	SLR 7835	4581691.526	556159.691	4389359.584	0.001	0.001	0.001			
10002S001			-.0142	0.0188	0.0116	.0001	.0001	.0001			
10002S002	Grasse (OCA)	SLR 7845	4581692.069	556196.178	4389355.170	0.001	0.001	0.001	1	00:000:00000	01:180:00000
10002S002			-.0142	0.0188	0.0116	.0001	.0001	.0001			
10002S002	Grasse (OCA)	SLR 7845	4581692.060	556196.176	4389355.154	0.001	0.001	0.001	2	01:180:00000	00:000:00000
10002S002			-.0142	0.0188	0.0116	.0001	.0001	.0001			
10077M002	AJACCIO	SLR 7848	4696991.918	724001.667	4239671.644	0.003	0.004	0.003			
10077M002			-.0147	0.0199	0.0099	.0011	.0014	.0010			
10503S001	METSAHOVI	SLR 7805	2892595.258	1311807.925	5512610.977	0.009	0.008	0.007			
10503S001			-.0157	0.0164	0.0140	.0008	.0007	.0006			

Рисунок. Часть ITRF-таблицы

отображение, соответствующее движению земной коры. Для данного преобразования в области, имеющей хорошее покрытие станциями, мы можем вычислить степень отображения и уже в зависимости от ее значения делать выводы о наличии неподвижной точки внутри данной области. При этом неподвижная точка будет представлять собой некую точку накопления напряжения, в которой в дальнейшем возможен разрыв – землетрясение.

Когда степень отображения небольшой области равна нулю, можно считать, что в ней нет «опасных» точек. В противном случае данная область является сейсмически опасной.

Для подсчета степени отображения рассматривалась двумерная система, то есть не учитывались данные измерения глубины. Были взяты начальные координаты x и y расположения каждой станции и значения смещений станций в год по этим координатам. Так как станции располагаются не по границам сферы, то использовалась описанная в [6] связь метода «выхода в $(n + 1)$ -мерное пространство» и метода с использованием степени отображения. Областью исследования считается некоторый регион, для которого строится таблица углов. Если в этой таблице находятся сочетания «знаков» (или, другими словами, в каждой из четвертей находится хотя бы одна точка), то можно утверждать, что внутри области есть неподвижная точка вероятного разрыва.

С помощью описанного алгоритма были проведены исследования по таблице смещений земной коры за несколько лет. Например, исследовалась область Южной Америки. При этом была выявлена подобласть, содержащая неподвижную точку в период с 2005 года. Этому было найдено и подтверждение из истории данного региона. Действительно, в период с 2005 года в таких государствах Южной Америки, как Перу и Чили, было зарегистрировано большое количество подземных толчков с магнитудой до 8,8. Особенно крупным было землетрясение 27 февраля 2010 года у побережья Чили близ Сантьяго, вызвавшее цунами и повлекшее за собой потерю множества человеческих жизней.

Выводы

К сожалению, предложенная методика дает результаты только в случае исследования регионов с высоким покрытием станциями. При этом движение земной коры происходит довольно медленно, и данные появляются в открытом доступе, как правило, не чаще, чем раз в год. И, конечно, результаты, полученные по столь грубым данным, не дают возможности краткосрочного прогноза и достаточной локализации места события, являясь лишь подтверждением карт сейсмического районирования, которые строят ученые для каждого из районов Земли.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Короновский Н., Наймарк А. Землетрясение: возможен ли прогноз? // Наука и жизнь. 2013. № 3 [Электронный ресурс]. URL: <https://www.nkj.ru/archive/articles/21828> (дата обращения: 12.03.2019).
2. International Terrestrial Reference Frame [Электронный ресурс]. URL: <http://itrf.ign.fr> (дата обращения: 12.03.2019).
3. International DORIS Service [Электронный ресурс]. URL: <https://ids-doris.org> (дата обращения: 12.03.2019).
4. Satellite Laser Ranging (SLR) [Электронный ресурс]. URL: <https://www.iers.org/ IERS/EN/Science/Techniques/slr.html> (дата обращения: 12.03.2019).
5. Молотов И. Е. Радиоинтерферометрия со сверхбольшими базами (РСДБ) – история, состояние и аппаратура [Электронный ресурс]. URL: <http://lfnv.astronomer.ru/report/0000007/p000007.htm> (дата обращения: 12.03.2019).
6. Фомочкина А. С., Гливенко Е. В. Использование геометрических и топологических свойств системы уравнений в вычислительных методах // Вопросы радиоэлектроники. 2016. № 7. С. 42–43.

ИНФОРМАЦИЯ ОБ АВТОРАХ

Гливенко Елена Валерьевна, д.т.н., профессор, ФГАОУ ВО «РГУ нефти и газа (НИУ) имени И. М. Губкина», Российская Федерация, 119991, Москва, Ленинский просп., д. 65; консультант по научной работе, АО «Научно-исследовательский

институт вычислительных комплексов им. М. А. Карцева», Российская Федерация, 117437, Москва, ул. Профсоюзная, д. 108, тел.: 8 (495) 336-80-77.

Фомочкина Анастасия Сергеевна, к.т.н., доцент, ФГАОУ ВО «РГУ нефти и газа (НИУ) имени И.М. Губкина», Российская Федерация, 119991, Москва, Ленинский просп., д. 65; старший научный сотрудник, ФГБУН «Институт теории прогноза землетрясений и математической геофизики РАН», Российская Федерация, 117997, Москва, ул. Профсоюзная, д. 84/32, тел.: 8 (495) 333-45-56, e-mail: nastja_f@bk.ru.

Трифоновна Дарья Александровна, магистрант, ФГАОУ ВО «РГУ нефти и газа (НИУ) имени И.М. Губкина», Российская Федерация, 119991, Москва, Ленинский просп., д. 65, e-mail: d_trifonova@bk.ru.

For citation: Glivenko E. V., Fomochkina A. S., Trifonova D. A. Study of degree of continuous mapping, conforming to movement of earth crust. Voprosy radioelektroniki, 2019, no. 5, pp. 108–111. DOI 10.21778/2218-5453-2019-5-108-111

E. V. Glivenko, A. S. Fomochkina, D. A. Trifonova

STUDY OF DEGREE OF CONTINUOUS MAPPING, CONFORMING TO MOVEMENT OF EARTH CRUST

The paper discusses the vector field, which is the movement of the earth's crust. This motion is recorded using various modern methods and is considered as a transformation for which the degree of mapping can be calculated. At the beginning of the paper shows the various coordinate systems and methods of recording. Then there is a description of the tables in which the coordinates and their changes over time are entered. From these data, for some regions, the table of angles can be constructed and the degree of mapping calculated. The results of calculations allow us to draw conclusions about the presence of fixed points of the vector field inside the considered region. Such points indicate the accumulation of stress in rocks in a given area, which can further lead to rupture – an earthquake.

Keywords: vector field, international coordinate system, seismic activity

REFERENCES

1. Koronovskii N., Naimark A. Earthquake: is a forecast possible? *Nauka i zhizn*, 2013, no. 3. (In Russian). Available at: <https://www.nkj.ru/archive/articles/21828> (accessed 12.03.2019).
2. International Terrestrial Reference Frame. Available at: <http://itrf.ign.fr> (accessed 12.03.2019).
3. International DORIS Service. Available at: <https://ids-doris.org> (accessed 12.03.2019).
4. Satellite Laser Ranging (SLR). Available at: <https://www.iers.org/IERS/EN/Science/Techniques/slr.html> (accessed 12.03.2019).
5. Molotov I. E. Radio interferometry with ultra-large bases: history, condition and equipment. (In Russian). Available at: <http://ifvn.astronomer.ru/report/0000007/p000007.htm> (accessed 12.03.2019).
6. Fomochkina A. S., Glivenko E. V. The use of geometric and topological properties of the system of equations in computational methods. *Voprosy radioelektroniki*, 2016, no. 7, pp. 42–43. (In Russian).

AUTHORS

Glivenko Elena, D. Sc., professor, Gubkin Russian State University of Oil and Gas, 65, Leninsky Prospect, Moscow, 119991, Russian Federation; scientific consultant, M. A. Kartsev Computing System Research and Development Institute (NIIVK, JSC), 108, Profsoyuznaya St., Moscow, 117437, Russian Federation, tel.: +7 (495) 336-80-77.

Fomochkina Anastasia, Ph. D., assistant professor, Gubkin Russian State University of Oil and Gas, 65, Leninsky Prospect, Moscow, 119991, Russian Federation; senior researcher, Institute of Earthquake Prediction Theory and Mathematical Geophysics RAS, 84/32, Profsoyuznaya St., Moscow, 117997, Russian Federation, tel.: +7 (495) 333-45-56, e-mail: nastja_f@bk.ru.

Trifonova Daria, student, Gubkin Russian State University of Oil and Gas, 65, Leninsky Prospect, Moscow, 119991, Russian Federation, e-mail: d_trifonova@bk.ru.