

КАК ПРОГНОЗИРАХМЕ ЗЕМЕТРЕСЕНИЕТО ОТ 2010 Г. В ЦЕНТРАЛНО ЧИЛИ С ДАННИ ОТ КОСМИЧЕСКАТА ТЕХНОЛОГИЯ GPS И МОДЕЛИРАНЕ

Димитър Димитров¹, Жан-Клод Рюег²

¹Национален институт по геофизика, геодезия и география (НИГГГ) – БАН

²Институт по физика на Земята, Париж, Франция

e-mail: clgdimi@abv.bg

Ключови думи: Земетресение, GPS данни, моделиране

Резюме: GPS мрежа от 41 точки в централно Чили позволи да се определят значителни премествания на контролните станции, отражение на натрупваните в резултат на субдукцията интерсеизмични напрежения. Анализът на изпълнените три цикъла GPS измервания 1996, 1999 и 2002 г. определи значителни интер-сеизмични движения със скорост от 34 до 45 mm/год по бреговата ивица и от 20 до 10 mm/год по планинската верига на Андите. Посоката на векторите на скоростите е N 75° и е съвместима с тази на субдукцията на плочата Наска под Южна Америка. Значителната разлика между скоростите на движение на реперите стабилизирани по бреговата ивица и тези по планинска веригата на Андите показва акумулиране на сеизмогенни напрежения в областта над зоната на контакт. Получените данни от GPS преизмерванията позволиха да се моделира подпъхването на тектонската плоча Наска под тази на южна Америка и да се определят точно мястото и параметрите на субдукцията: азимут N 19°; наклон 16°; хлъзгане 67 mm/год и дълбочина на сблъсъка 55 km. Изследването доказва, че между субдукционната зона и мощната верига на Андите се натрупват огромни напрежения, увеличаващи опасността от ново силно земетресение с $M \geq 8-8.5$ в района на градовете Консепсион и Конститусион, заключен между 35° и 37°S. На 27.02.2010 г. земетресение с $M_w=8.8$ стана в изследваната зона, с изследваният механизъм.

EARTHQUAKE HAZARD BY SPACE GPS TECHNOLOGY AND MODELING

Dimitar St. Dimitrov¹ and Jean-Claude Ruegg²

¹National Institute of Geophysics, Geodesy and Geography of Bulgarian Academy of Sciences (NIGGG of BAS)

²Institute de physique du Globe (IPGP), Paris, France

e-mail: clgdimi@abv.bg

Keywords: Earthquake, GPS data, modeling

Abstract: The earthquake occurred on the Chilean mega-thrust where another large earthquake had occurred in 1835 ($M & 8-8.5$). Since that time no major earthquake had occurred in this region. The average repeat time of Chilean megathrust earthquakes is estimated to be 100–200 years. Investigators began taking GPS measurements in this general area in 1996-1999-2002. Analysis of GPS data of 41 stations present the movements the $45-10 \pm 1$ mm/y from Saud America. On the basis of the displacement field determined by the 6-year GPS survey, concluded that if plate coupling had been 100 % since 1835, approximately 10 meters of slip deficit was present along this gap (slip deficit is the amount of slip that would occur if the accumulated strain is released in an earthquake) and forecasted an $M_w 8.5$ earthquake in this gap. A forecast of the 2010 Maule, Chile, earthquake ($M_w=8.8$) is a good example. On February 27, 2010, an $M_w = 8.8$ earthquake did occur in the expected area, and with the expected mechanism.

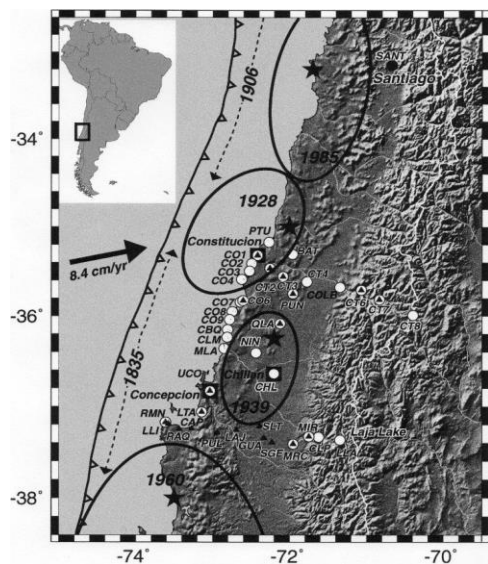
Описание на зоната, сеизмичността и GPS мониторингът

Бреговата ивица на Чили е една от най-сеизмогенните зони в света, където приблизително на всеки десет години стават силни земетресения с магнитуд $M > 8$. Районът на градовете Консепсион и Конститусион, заключен между 35° и 37°S е известен с много силното земетресение от февруари 1835 г. [1] с $M=8,5$ [2]. Тази сеизмогенна зона е в непосредствена

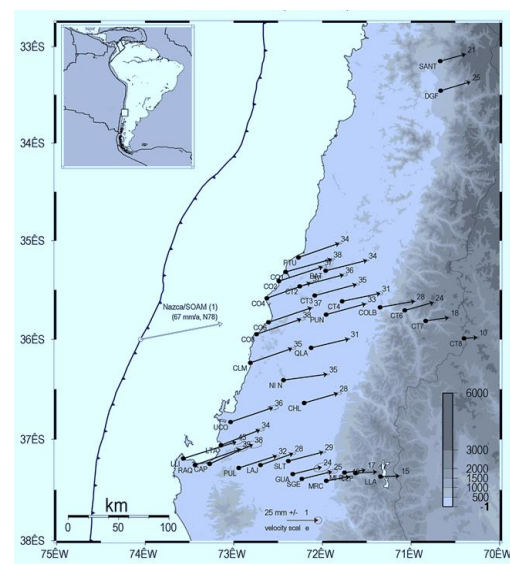
близост до епицентъра на най-силното земетресение регистрирано в света през 1960 г. с $M=9.5$ [2] и е пострадала и от Чиланското земетресение от 25.01.1939 г. с $M = 7.9$.

При изброените земетресения в зоната са се появили големи пукнатини, мощни пропадания и издигания на участъци от сушата, много от реките са променили руслото си и са се образували водопади. При трусът от 1835 г. остров Санта Мария с площ от 30 km² се издигнал с 3 m [1]. Повечето от трусовете в тази зона на подпъхване на Тихоокеанската тектонска плоча "Наска" под тази на Латинска Америка се проявяват с океански вълни "цунами", които причиняват огромни щети и много човешки жертви. Съвременни сеизмоложки изследвания показват, че силните трусове не са типични субдукционни земетресения, а са предизвикани от натрупани напрежения в земната кора [3].

В зоната между 35° и 37° не се наблюдава сеизмична активност от 1835 г. до наши дни. Това повишава в значителна степен опасността от силно и катастрофално земетресение в близко бъдеще в района. С цел да се изучат процесите на подготовка, разкъсване и възстановяване, свързани със силни земетресения и за изследване на интерсеизмичните напрежения именно в тази сеизмогенна зона с изявен риск от катастрофални трусове се стабилизираха на основна скала 41 контролни репери (Фиг. 1). Контролни репери се стабилизираха по два профила перпендикулярни на субдукционната зона, от брега на Тихи океан до билото на Андите, както и по брега на океана. Измерванията се извършиха с приемници Ashtech, с наблюдателните сесии от минимум 20 часа и в повечето случаи - 48 часа. По време на GPS кампаниите през 1996, 1999 и 2002 г. се инсталираха 4 постоянни станции.



Фиг. 1

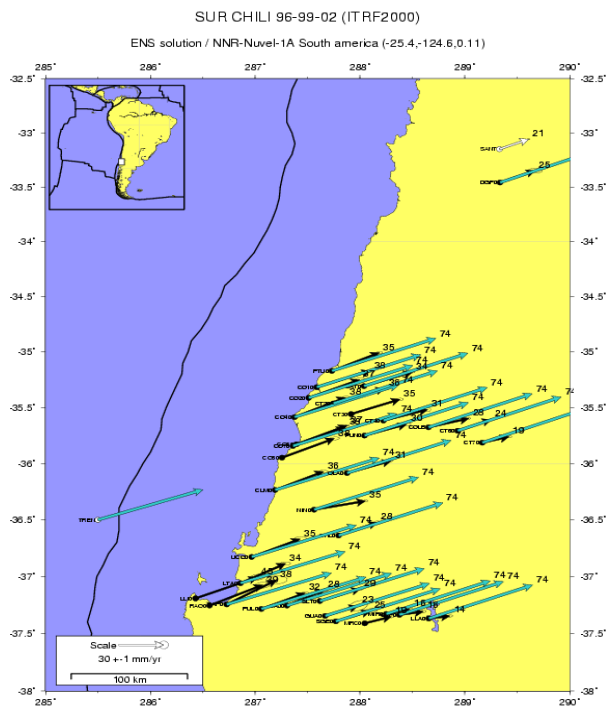


Фиг. 2

Фиг. 1. Локализиране на изследваната сеизмогенна зона и GPS станциите в централно Чили. С черни звезди са представени епицентрите на земетресенията 1928, 1939, 1960 и 1985 г. и с елипсите – зоните с максимална деформация и поражения. Пунктираните линии показват зоните на максимални поражения от трусовете от 1835 и 1906 г. Зоната на конвергенция е представена по модела Nuvel-1.

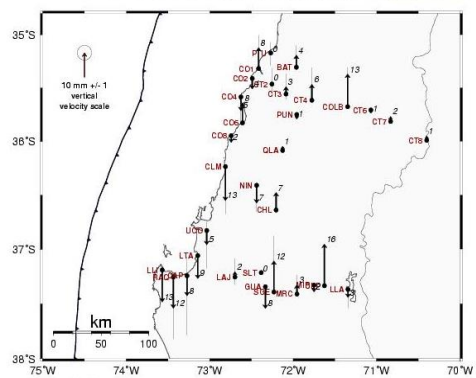
Фиг. 2. GPS скорости 1996-1999-2002 г. релативни към стабилна Южна Америка. Черните точки локализируют GPS станциите. Стрелките представят хоризонталните скорости и сивите цифри показват техните стойности в mm/год. Елипсите на грешките са с 99% доверителен интервал.

Обработката на GPS данните се извърши от два независими екипа във Франция и в България, с два софтуера Bernese 4.0 и GAMIT/GLOBK 9.94. Координатната система се дефинира от координатите и скоростите на 5 перманентни IGS станции, намиращи се на относително стабилната част на Южноамериканската континентална плоча, в Световната земна координатна система ITRF97. Измерените 1996-1999-2002 г. GPS скорости на контролните станции, релативни към стабилна Южна Америка са представени на Фиг. 2. Получените интер-сеизмични движения за периода 1996-1999-2002 г. се съгласуват много добре по посока със скоростите по геофизичния NUVEL1-A модел (Фиг.3). Стойностите на скорости на станциите по бреговата ивица съвпадат с моделните, докато тези на станциите по веригата на Андите са значително по-малки от скоростите по геофизичния модел.



Фиг. 3

Фиг. 3. Измерените GPS скорости 1996-1999-2002 г., релативни към стабилна Южна Америка, сравнени с моделните скорости по геофизичния NUVEL1-A модел



Фиг. 4

Фиг. 4. Схематична карта на средните вертикалните скорости на движение, получени от GPS данните от 1996-1999-2002 г., показани с вертикални стрелки и цифровите им стойности в mm/год

Основният извод, който беше направен от анализа на получените резултати е, че скоростите на движение на точките, разположени по беговата ивица в този район на Чили са значително по-големи – два до три пъти, от тези по веригата на Андите. Средната посока на векторите на скоростите е $75^{\circ}N$ и съвпада с посоката на конвергенция на плочата Наска спрямо Южноамериканската [4]. Разликата в скоростите на бреговата ивица и на мощната планинска веригата на Андите акумулира сеизмогенни напрежения, водещи да силните земетресения в зоната.

Значителните скорости на движение на контролните репери позволи да се регистрират с GPS и вертикалните им движения, представени със стрелки средните вертикалните скорости на реперите в mm/год, и с цифри стойностите (Фиг. 4).

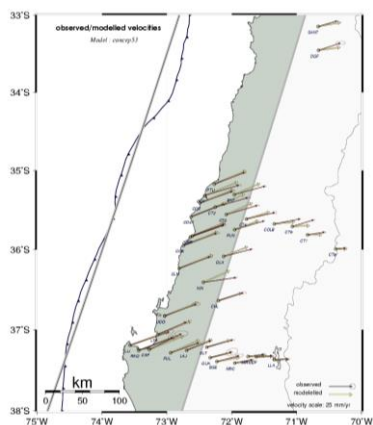
Моделиране на конвергенцията на тектонската плоча Наска с тази на южна Америка

Геометрията на субдукционната зона е дефинирана, следвайки разпределението на земетресенията в района [5], с ориентацията на зоната на контакт и крайбрежната ивица $N19^{\circ}$. Векторът, перпендикуларен на континенталния жлеб е с ориентация $N109^{\circ}$, докато средната посока на конвергенция между плочите е $N76^{\circ}$. Приема се, че горната част на зоната на субдукционен контакт, т.н. “сеизмична зона” [5], простираща се в дълбочина до 30-50 km, е неподвижна по време на интерсеизмичния цикъл. Зоната в дълбочина, под 50 km, е моделирана като зона на хлъзгане (или подпъхване) чрез обратна задача на Окада, 1985, като се приема, че скоростта ѝ е 84 mm/год, съответстваща на скоростта на конвергенция на плочите Наска и Южна Америка [4]. Сечението на зоната е показано на Фиг.5, като с тънка линия е очертана геометрията на “сеизмичната зона”, а с дебела черна линия – моделната зона на хлъзгане. Моделирането на “сеизмичната зона” и зоната на хлъзгане, сравнявайки измерените и моделните скорости показва най-добри резултати при дълбочина 58 km. Така определената дълбочина е в пълно съгласие с термалния модел на [6]. Получените “моделни” скорости са сравнени с определените GPS скорости и са проектирани върху линията $N109^{\circ}$, перпендикулярна на субдукционната зона (Фиг.6). Моделното изследване по се осъществи независимо от двата екипа като получените резултати се съгласуват напълно.

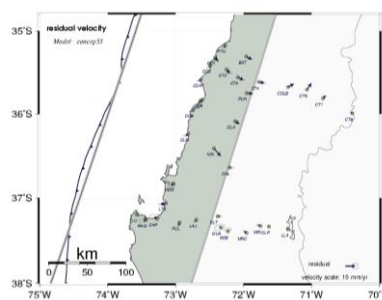
Получените от GPS мониторинга данни в централно Чили, позволиха да се установи чрез моделерането мястото на подпъхането (субдукцията) на тектонската плоча Наска под тази на южна Америка, като крайният модел има следните параметри:

- азимут на субдукцията (Strike) - N 19°;
- наклон на плана на субдукцията (Dip) - $16^\circ \pm 3^\circ$;
- хлъзгане по плана на субдукцията (Slip) - 67 mm/год;
- дълбочина на сблъсъка (при събирането на двете плочи) - 55 ± 5 km;
- най-голямо отклонение при моделирането (Mean residual) - 3.6 mm/год.

Сравнението на определените от GPS мониторинга скорости с тези от моделирането показва много добро съгласуване. (Фиг. 5). Разликата между измерените и моделните скорости (т.нар. остатъчни грешки), потвърждава много-доброто съвпадение на величините и посоките на скоростите (Фиг. 6).



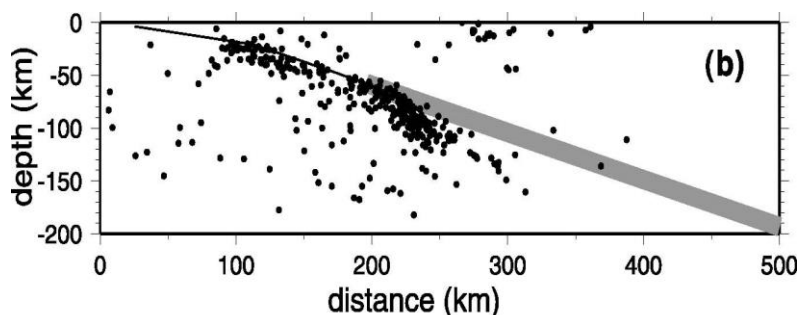
Фиг. 5



Фиг. 6

Фиг. 5. Съвпадане на данните от еластичното моделиране на повърхностните плочови деформации в Централно Чили с GPS определените скорости, представени с кафявите стрелки, а моделните скорости със сиви стрелки. Със сив контур е представен плана на субдукцията, в сив цвят е защрихована дислокацията на този план под изследваната зона.

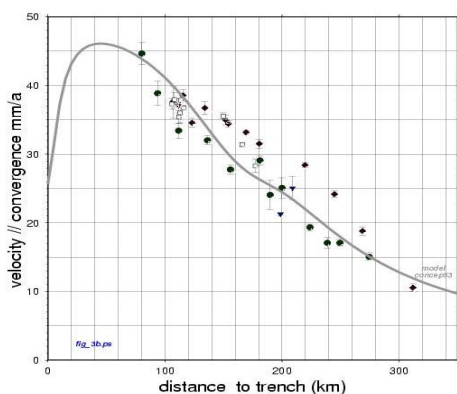
Фиг. 6. Остатъчни грешки (разликата между наблюдаваните и моделните скорости), представени с черни стрелки, при еластичното моделиране на повърхностните плочови деформации в Централно Чили. Със сив цвят е представена зоната на дислокацията.



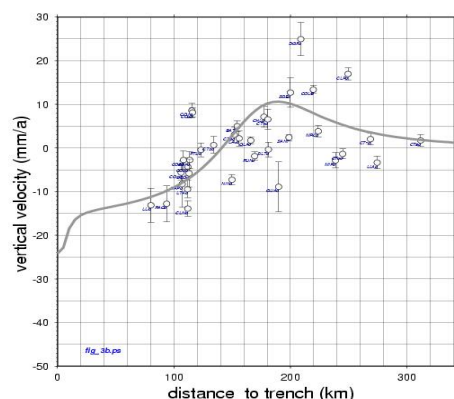
Фиг. 7. Сечение перпендикулярно на субдукцията N76° с установеното място на конвергенцията на тектонската плоча Наска под тази на южна Америка, върху инструменталната сеизмичност в района.

На Фиг. 7. е показано съгласуване на получените от моделното изследване параметри - наклон на подпъхането на тектонската плоча Наска под тази на южна Америка и дълбочината на конвергенцията (сблъсъка) на двете тектонски плочи, със съвременната инструментална сеизмичност.

Сравнението на измерените скорости с изчислените от крайният модел са представени графично чрез сечения перпендикулярни на конвергенцията на Фиг. 8, а за вертикалните скорости и на Фиг.9. Със сивата плътна линия са показани моделните хоризонтални премествания (Фиг. 8) и моделните вертикални премествания (Фиг. 9), спрямо конвергенцията, представена на Фиг. 5, 6 и 7.



Фиг. 8



Фиг. 9

Фиг. 8. Сечение перпендикулярно на конвергенцията с хоризонталните скорости, успоредни на посоката на конвергенцията. Сивата линия показва моделните хоризонтални скорости, а измерените скорости, представени на с черните точки.

Фиг. 9. Вертикалните скорости в mm/год, отнесени спрямо разстоянието до конвергенцията. Със сивата пълтна линия са показани моделните вертикални премествания, спрямо конвергенцията.

Заклучение

Резултатите от изследването определиха значителни интерсеизмични движения и напрежения в тази изявена сеизмогенна зона. GPS данните позволиха да се моделира подпъхването на тектонската плоча Наска под тази на южна Америка и да се определят точно мястото и параметрите на субдукцията. Получените параметри азимут на субдукцията (Strike) - $N 19^\circ$; наклон на плана на субдукцията (Dip) - $16^\circ \pm 3^\circ$; хлъзгане по плана на субдукцията (Slip) - 67 mm/год; дълбочина на сблъсъка на двете плочи - 55 ± 5 km, определиха значителния сеизмичен момент M_0 на натрупаните тектонски напрежения в зоната между 35° и $37^\circ S$ и градовете Концепсион и Конститусион:

$M_0 = \mu \cdot S \cdot D$	$\mu = 3 \cdot 10^{11}$ [dine/cm ²]	или	$\mu = 3 \cdot 10^{-1}$ [N/m]
	D = преместване по разлома [cm]		D = 6.7 cm/y x 174 y = 1165.8 cm = 11.658 m
	S = площ на разлома [cm ²]		S = 100 km x 50 km = 5×10^{13} cm ²

$$M_0 = 100 \times 50 \text{ km} = 5 \times 10^{13} \text{ cm}^2 \times 1165.8 \text{ cm} \times 3 \cdot 10^{11} = 17.487 \times 10^{27} \text{ [dine/cm]} = 1.7487 \times 10^{21} \text{ [N/m]}$$

Изследването доказва, че между субдукционната зона заключена между 35° и $37^\circ S$, и градовете Концепсион и Конститусион в централно Чили и мощната верига на Андите, е натрупано огромно напрежение $M_0 = 1.7478 \times 10^{21}$ [N/m] увеличаващо опасността от силно земетресение с $M \geq 8.5$.

Ние публикувахме резултатите от тези изследвания в специализирани издания и предупредихме Гражданската защита на Чили за сеизмичната опасност в района на градовете Концепсион и Конститусион.

Ruegg J-C., Dimitrov et al. (2002), "Interseismic strain accumulation in Southern Chile from GPS measurements", *Geophysical Research Letters*, Vol.29, No 11. **„...this area is probably mature for a next large EQ....“**

J. C. Ruegg, D. Dimitrov et al. (2009) "Interseismic strain accumulation measured by GPS in the seismic gap between Constitución and Concepcion in Chile", *Physics of the Earth and Planetary Interiors*, 5140, 78-85.

„...We conclude that the part of the Conception–Costitution gap has accumulated a slip deficit that is large enough to produce a very large EQ of about $M_w = 8.0-8.5$ “.

На 27.02.2010 г. в изследваната зона, между градовете Конститусион и Концепсион в централно Чили Chile, стана катастрофално земетресение с $M_w=8.8$ и $E=4.7+0.9 \times 10^{16}$ [N.m]

Hiroo KANAMORI (2015) Earthquake Hazard Mitigation and Real-Time Warnings of Tsunamis and Earthquakes **“A forecast of the 2010 Maule, Chile, earthquake ($M_w = 8.8$) is a good example a successful forecast on the basis of scientific data and methodology“.**

За сравнение представяме M_0 на земетресенията в югозападна Турция от началото на 2023 г.

2023/02/06 01h17:35 37.032 37.174 $h=13.0$ km $M_w=8.01$ $M_0=0.8101^{21}$ Турция
2023/02/06 10h 24:49 37.203 38.240 $h=13.5$ km $M_w=7.55$ $M_0=0.1692^{21}$ Турция

Литература:

1. Darwin (1851) Geological observation on coral reefs, volcanic island and on South America, Londres, 768 p.
2. Lomnitz, C., (1971) Grandes terremotos y tsunamis en Chile durante el periodo 1535–1955, Geofis. Panamericana, 1, 151–178, 1971.
3. Campos, J. and E. Kausel (1990), The large 1939 Intraplate earthquake of Southern Chile, Seis. Res. Lett., 61–81.
4. DeMets et al., (1990), Current plate motions, Geophys. J. Int., 101, 425–478.
5. Campos J., D. Hatzfeld, R. Madariaga, E. Kausel, G. Lopez, A. Zollo, R. Fromm, G. Iannacone and S. Barrientos (2008) A seismological study of the 1835 seismic gap in South Central Chile, Earth Planet Sci. Lett. (in press)
6. Oleskevich et al., 1999 Oleskevich et al., The Updip and downdip limits to great subduction earthquakes: Thermal and structural models to Cascadia, SW Japon and Chile, J. Geophys. Res. 104, 14965–14991.
7. Okada, Y. (1985) Surface deformation due to shear and tensile faults in a half space, BSSA, 75, 1135–1154.