

Двадцать шестая Уральская молодёжная научная школа по геофизике

**Анализ деформаций земной поверхности, связанных с
сильнейшими Чилийскими землетрясениями начала XXI в., по
данным ГНСС**

Щевьёва Надежда Сергеевна¹,

Владимирова Ирина Сергеевна^{1,2}

¹ИО РАН, г. Москва

²ФИЦ ЕГС РАН, г. Обнинск

¹Nadezda.Shchevyeva@yandex.ru

²vladis@gsras.ru

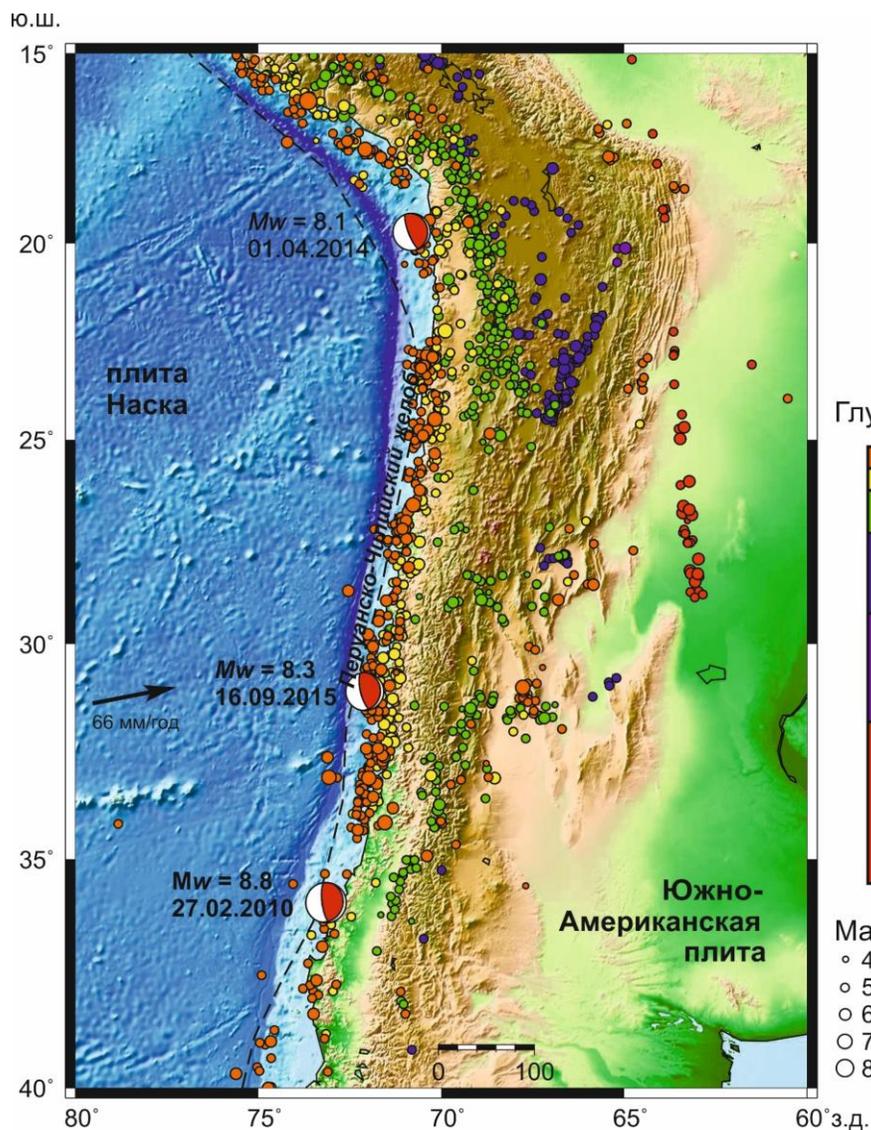
Пермь – 2025

Сейсмическая активизация Чилийской зоны субдукции в начале XXI в.

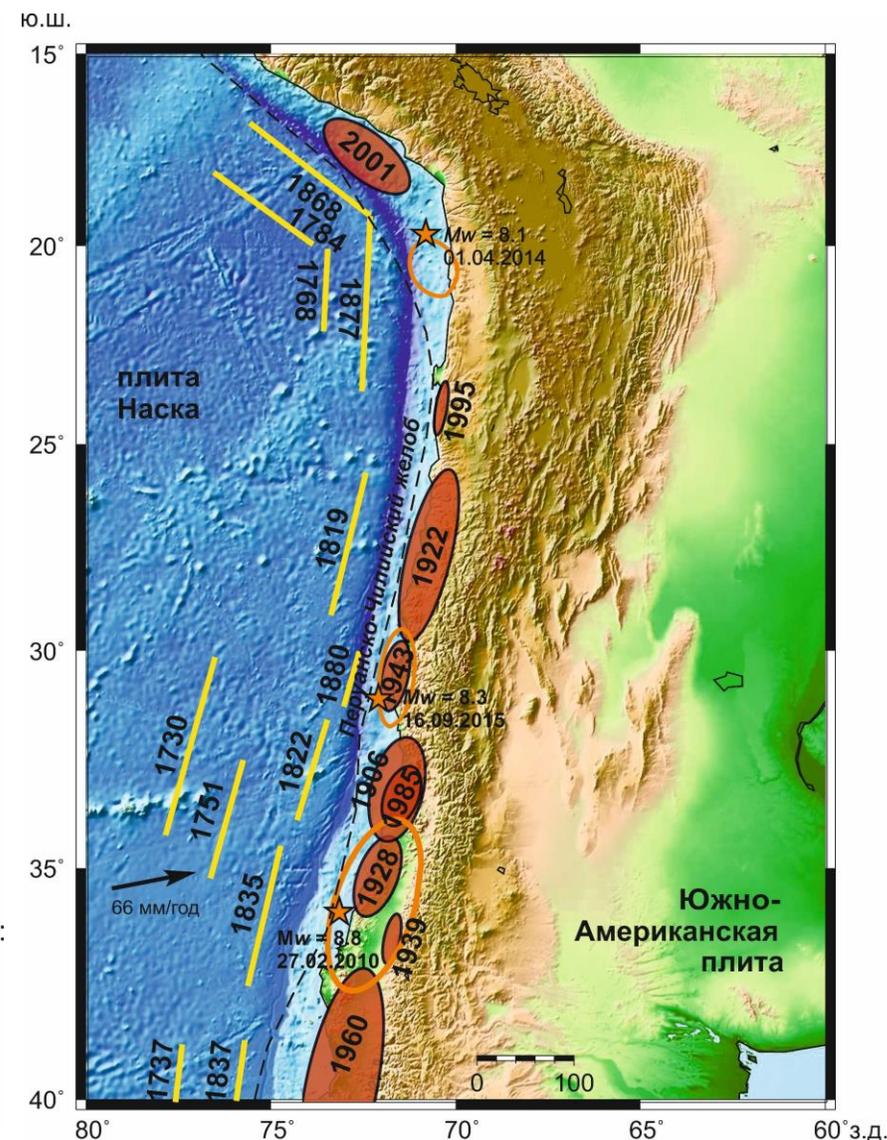
- Землетрясение Мауле
27 февраля 2010 г.
($M_w = 8.8$)

- Землетрясение Икике
1 апреля 2014 г.
($M_w = 8.1$)

- Землетрясение Ильяпель
16 сентября 2015 г.
($M_w = 8.3$)



Землетрясения, произошедшие в Чили с 1976 г. по 2010 г. (каталог СМТ)



Очаговые зоны исторических землетрясений в Чили.

Цель исследования

Объект исследования: деформации земной поверхности Чилийского побережья до и после ряда сильнейших землетрясений начала XXI в.

Цель работы: анализ вариаций деформаций земной поверхности на разных стадиях сейсмического цикла в Чилийской зоне субдукции по данным ГНСС и выявление в деформационных полях аномалий связанных с подготовкой сильнейших Землетрясений и релаксацией среды после них.

Данные:

Временные ряды 115 станций спутниковых геодезических измерений, предоставленные Геодезической обсерваторией Невады.



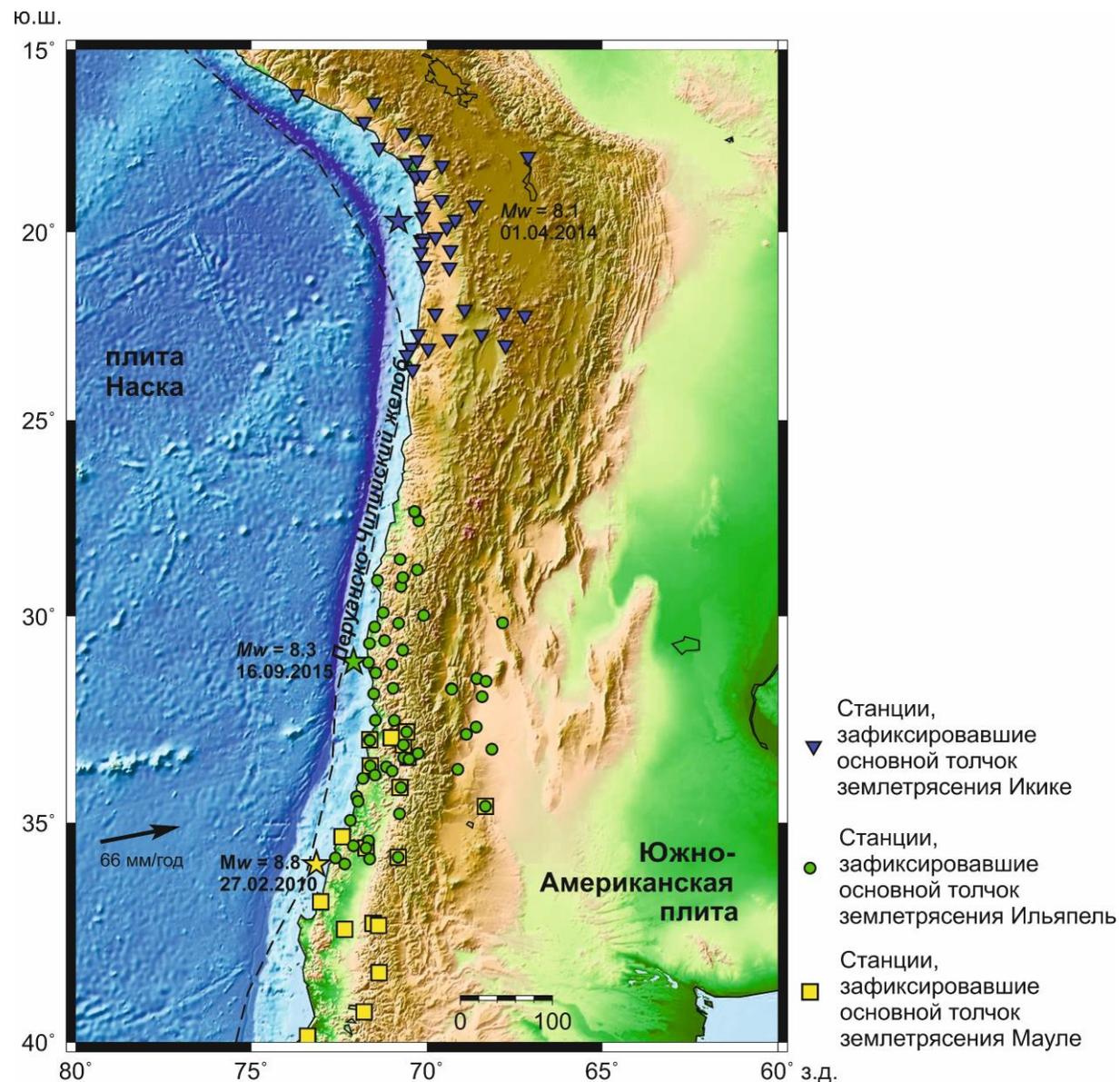
Последствия землетрясений Икике и Ильяпель



Последствия землетрясения Мауле³

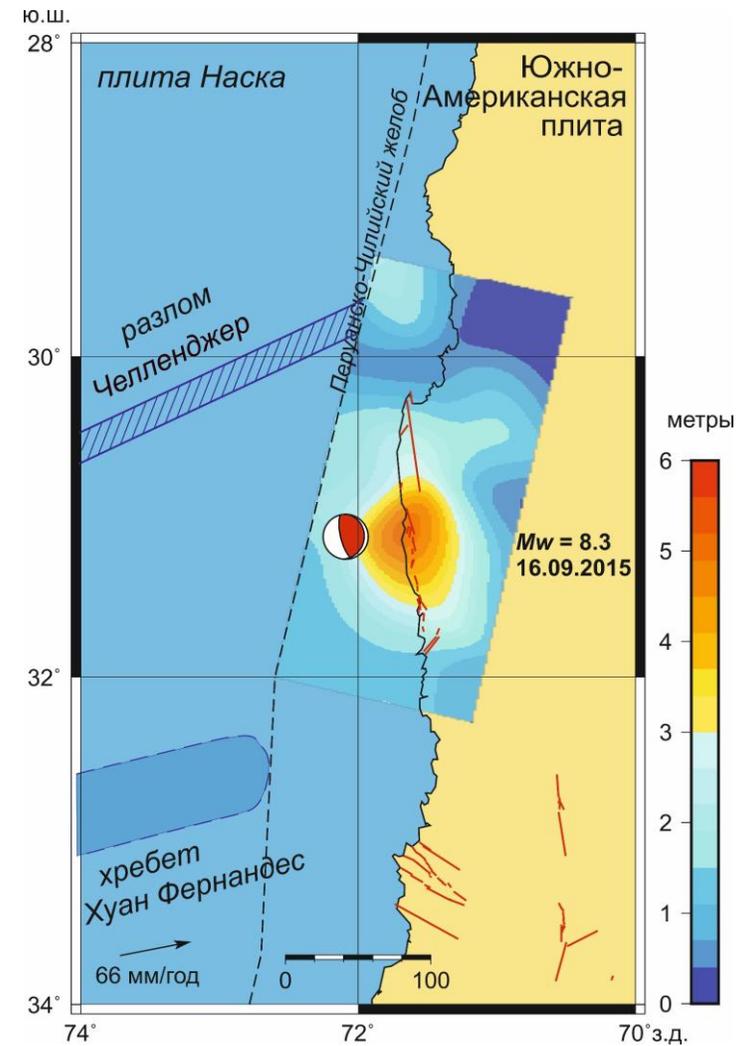
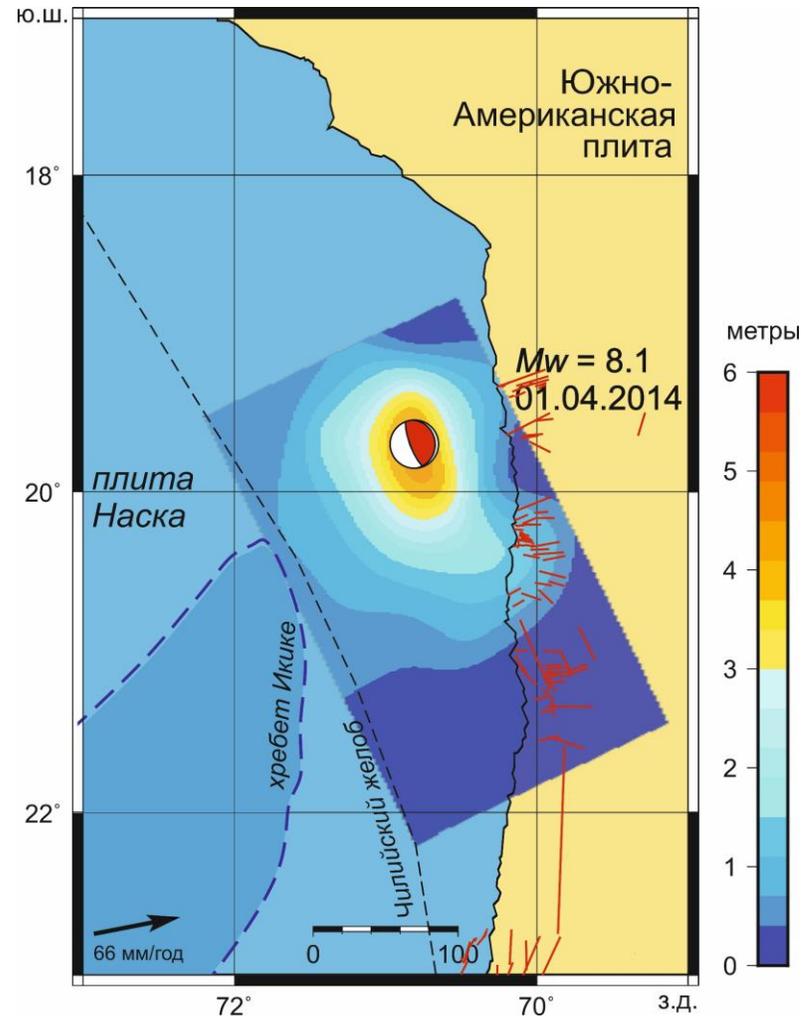
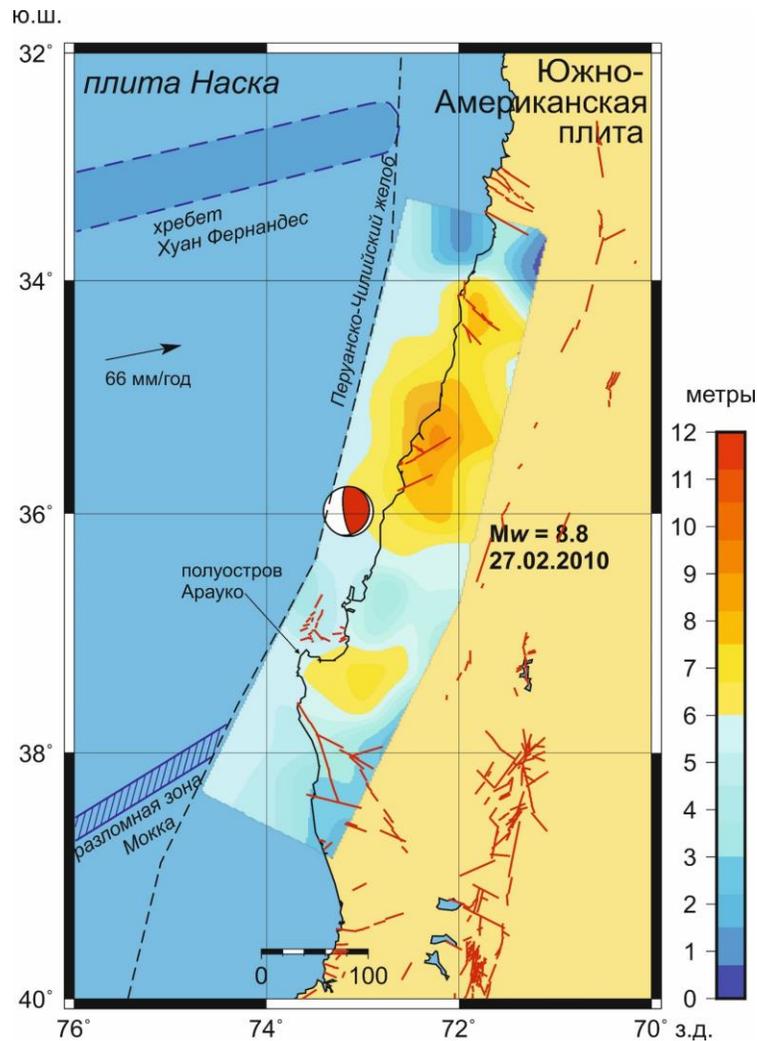
Данные ГНСС

- Мауле 27.02.2010
19 GPS-станций
- Икике 01.04.2014
44 GPS-станции
- Ильяпель 16.09.2015
60 GPS-станций



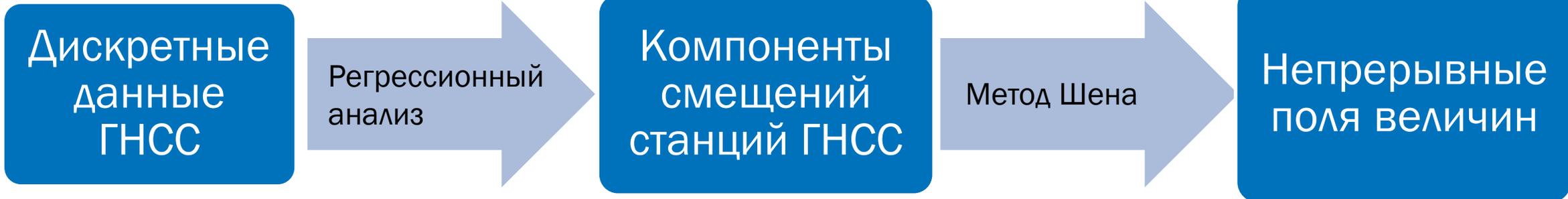
Карта станций, отобранных для расчётов.

Распределение сейсмической подвижки в очагах землетрясений

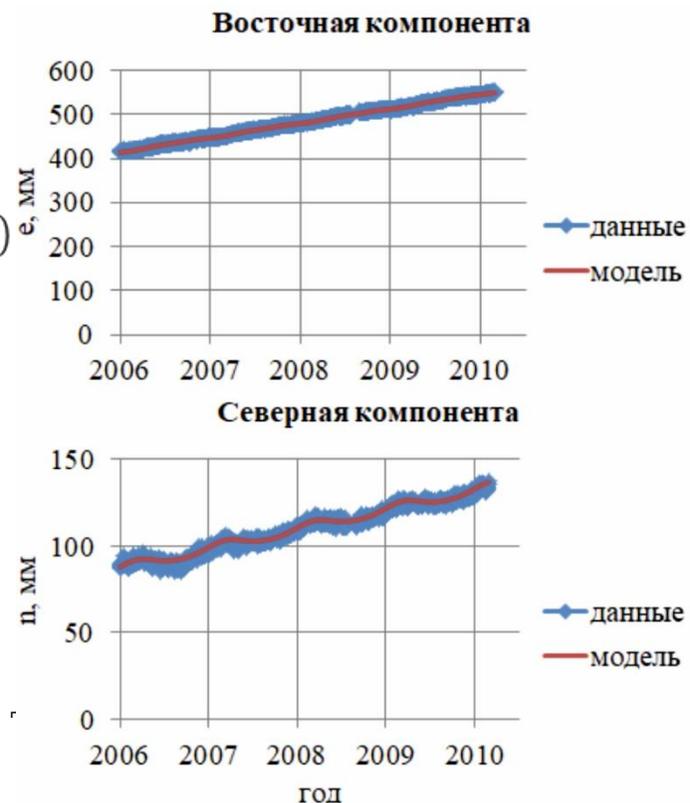


Результаты расчётов распределения сейсмической подвижки в очаге землетрясения: а) Мауле, 2010, б) Икике, 2014, в) Ильяпель, 2015. Чёрная стрелка – вектор скорости субдукции.

Получение непрерывных полей величин



$$\begin{aligned}
 y(t_i) = & a + bt_i + c \sin(2\pi t_i) + d \cos(2\pi t_i) + e \sin(4\pi t_i) \\
 & + f \cos(4\pi t_i) + \sum_{j=1}^{n_g} g_j H(t_i - \tau_g^j) + \sum_{j=1}^{n_h} h_j H(t_i - \tau_h^j) e, \text{ мм} \\
 & + \sum_{j=1}^{n_k} k_j H(t_i - \tau_k^j) H(\tau_k^{j+1} - t_i) \cdot t_i \\
 & + \sum_{j=1}^{n_l} l_j \ln\left(1 + \frac{t_i - \tau_l^j}{m_j}\right) H(t_i - \tau_l^j) + \\
 & \sum_{j=1}^{n_p} p_j \exp\left(-\frac{t_i - \tau_p^j}{r_j}\right) H(t_i - \tau_p^j) + \varepsilon_i
 \end{aligned}$$



Пример данных и рассчитанной функциональной модели временного ряда.

$$\begin{pmatrix} V_x^i \\ V_y^i \end{pmatrix} = \begin{bmatrix} 1 & 0 & \Delta x_i & \Delta y_i & 0 & \Delta y_i \\ 0 & 1 & 0 & \Delta x_i & \Delta y_i & -\Delta x_i \end{bmatrix} \begin{pmatrix} U_x \\ U_y \\ \dot{\varepsilon}_{xx} \\ \dot{\varepsilon}_{xy} \\ \dot{\varepsilon}_{yy} \\ \omega \end{pmatrix} + \begin{pmatrix} \varepsilon_x^i \\ \varepsilon_y^i \end{pmatrix},$$

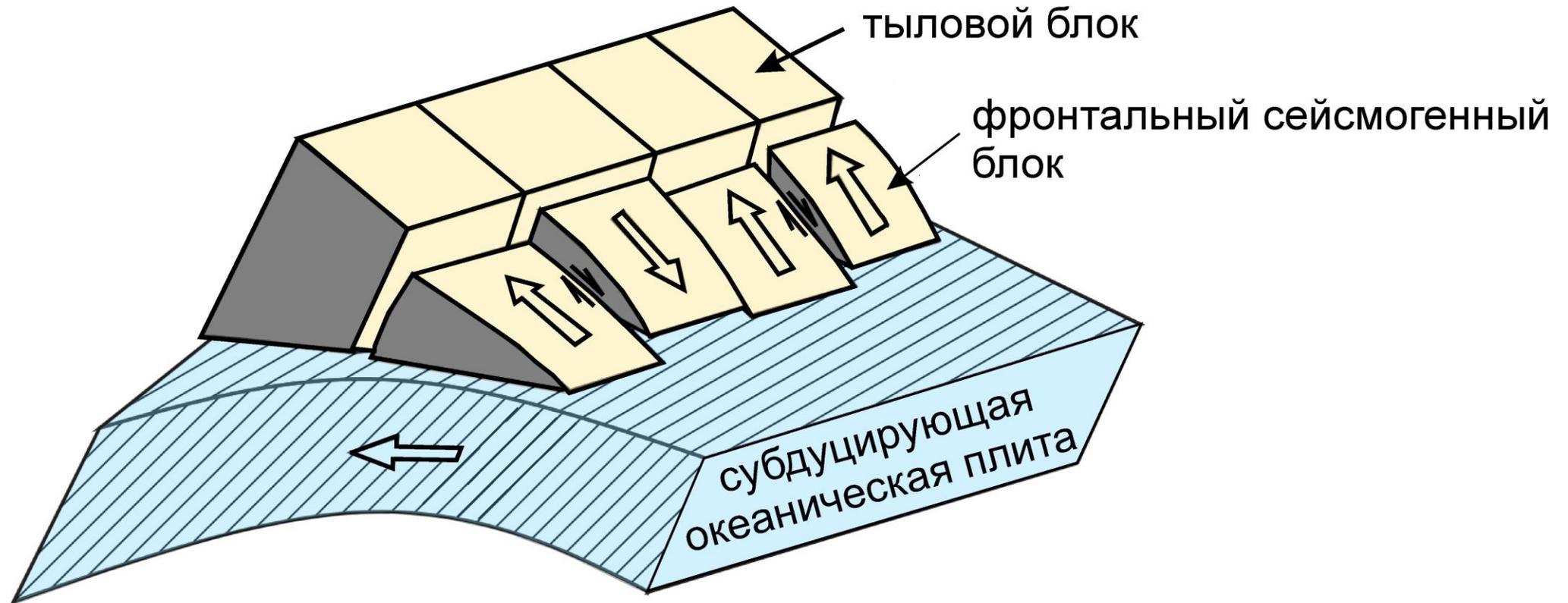
$$\gamma_{\max} = \frac{\dot{\varepsilon}_1 - \dot{\varepsilon}_2}{2}$$

$$I_1 = \dot{\varepsilon}_1 + \dot{\varepsilon}_2,$$

$$I_2 = \dot{\varepsilon}_1 \cdot \dot{\varepsilon}_2.$$

[Shen Z.-K., 1996]

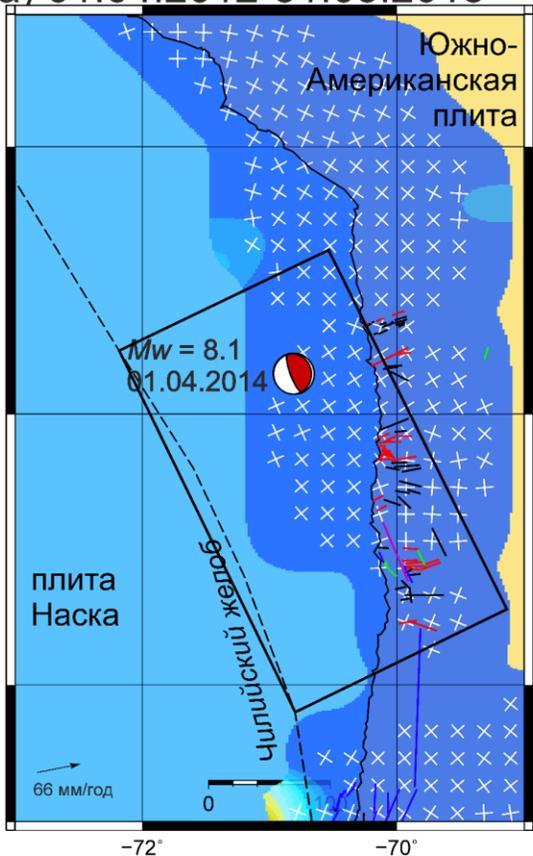
Клавишно-блочная модель строения континентальных и островодужных окраин



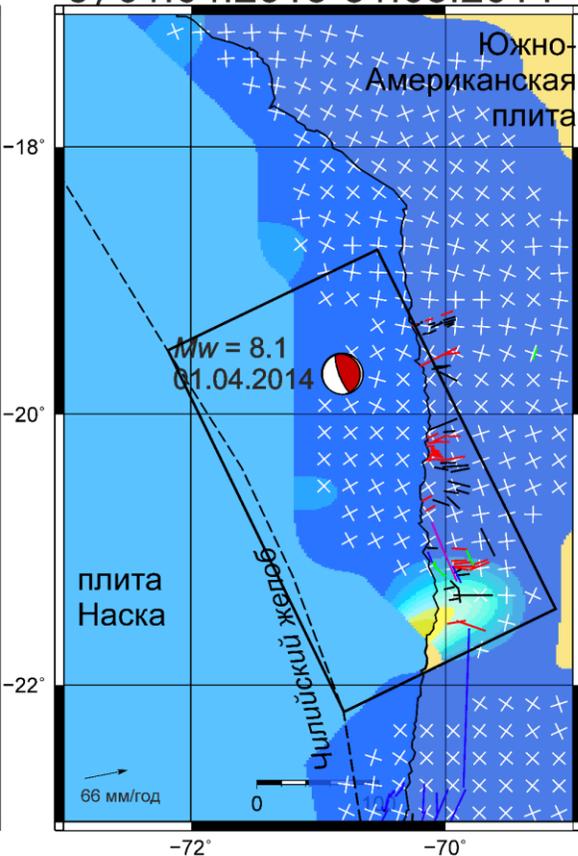
[Лобковский Л.И., Баранов Б.В., 1984]

Оценки максимальной скорости деформации сдвига, Икике 2014 г.

а) 01.04.2012-31.03.2013

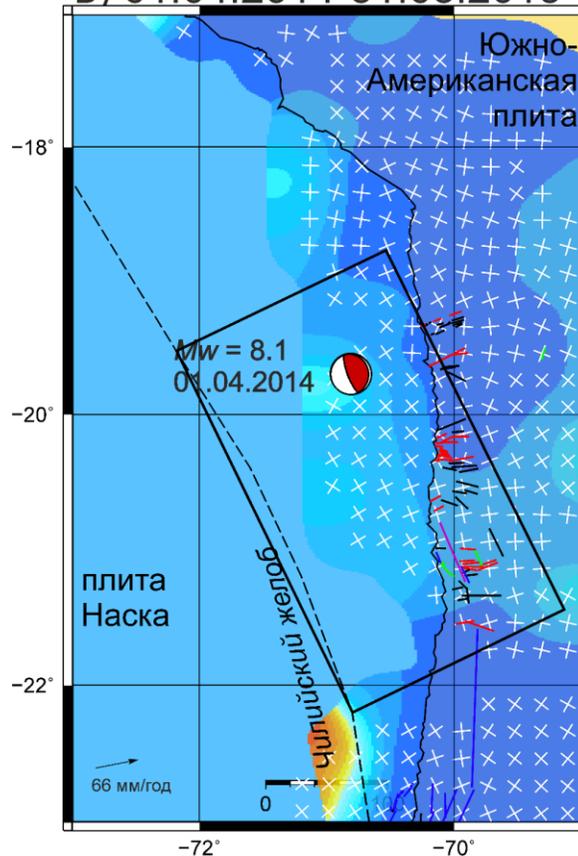


б) 01.04.2013-31.03.2014

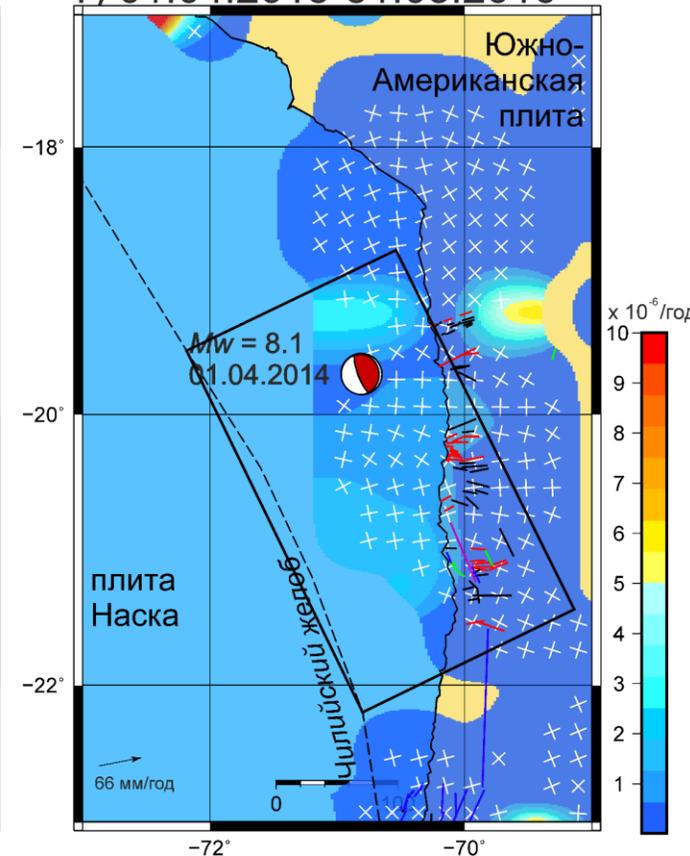


ЗЕМЛЯ

в) 01.04.2014-31.03.2015



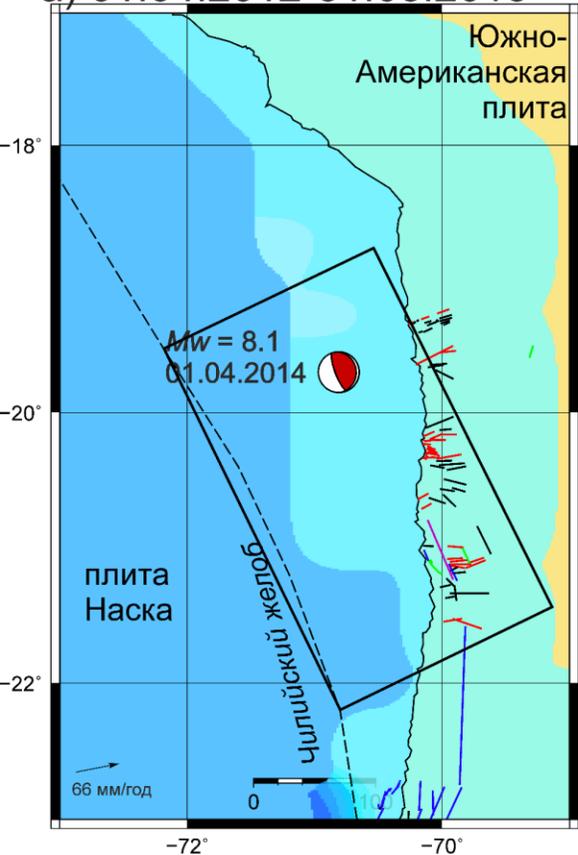
г) 01.04.2015-31.03.2016



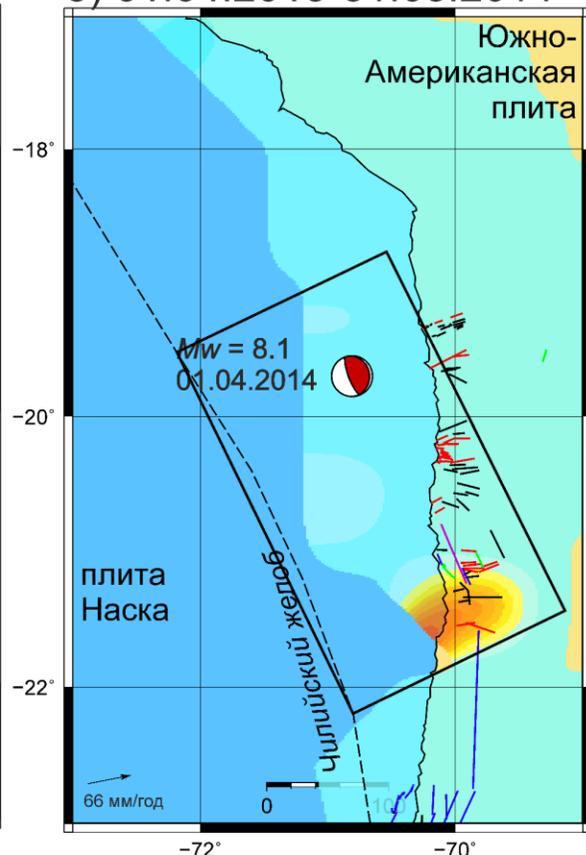
Поле скорости максимальной деформации сдвига, рассчитанное за годовые интервалы. Белые черточки показывают направление осей скорости максимальной деформации сдвига. Цветными линиями показаны разломы разных типов: красный – взброс, синий – сброс, зелёный – правосторонний сдвиг, фиолетовый – правосторонний сдвиг-взброс, черный – тип не определён.

Оценки скорости плоской дилатации, Икике 2014 г.

а) 01.04.2012-31.03.2013

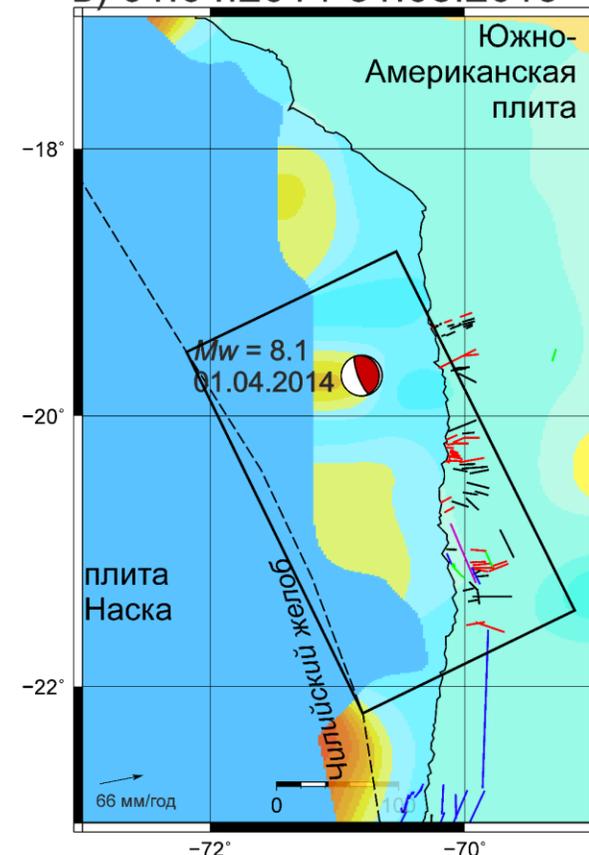


б) 01.04.2013-31.03.2014

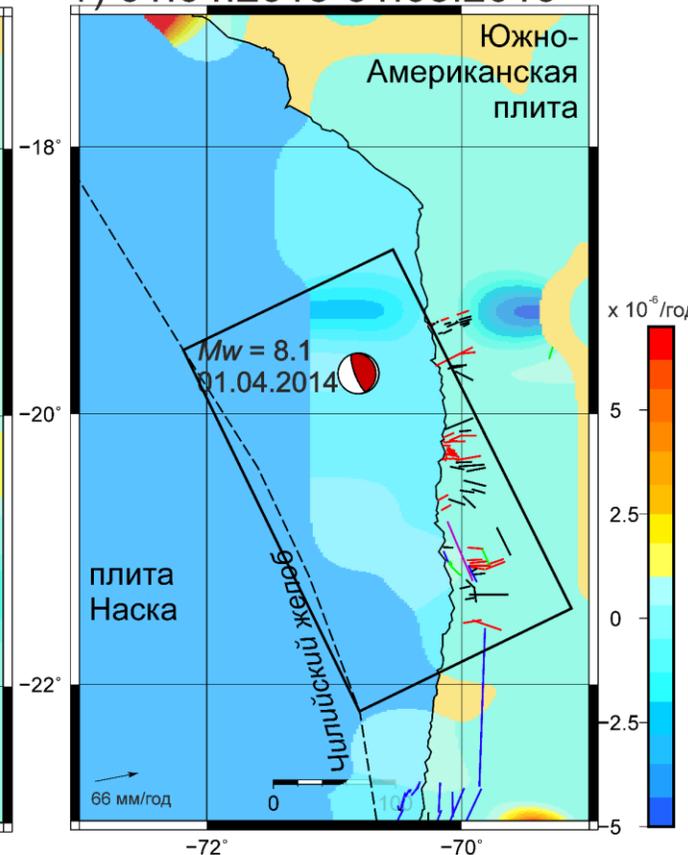


**З
Е
М
Л
Е
Т
Р
Я
С
Н
И
Е**

в) 01.04.2014-31.03.2015

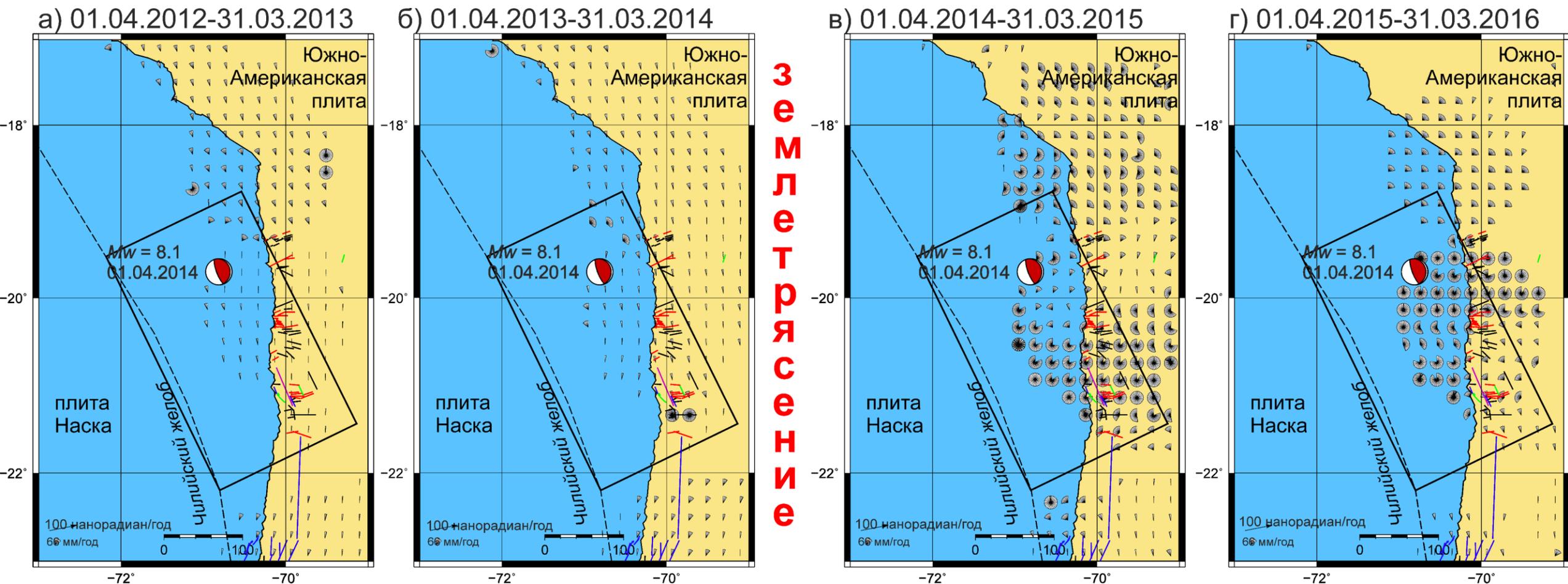


г) 01.04.2015-31.03.2016



Поле скорости плоской дилатации, рассчитанное за годовые интервалы. Цветными линиями показаны разломы разных типов: красный – взброс, синий – сброс, зелёный – правосторонний сдвиг, фиолетовый – правосторонний сдвиг-взброс, черный – тип не определен.

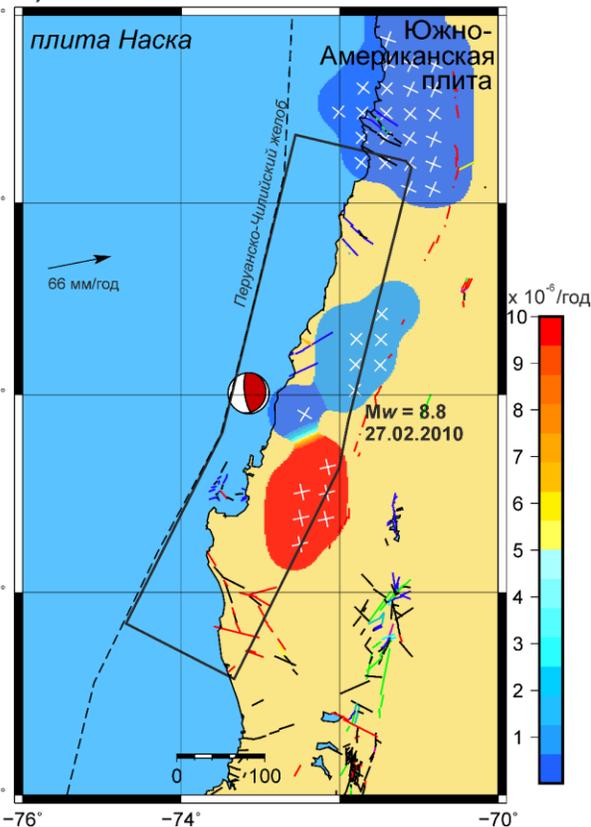
Оценка скоростей вращения, Икике 2014 г.



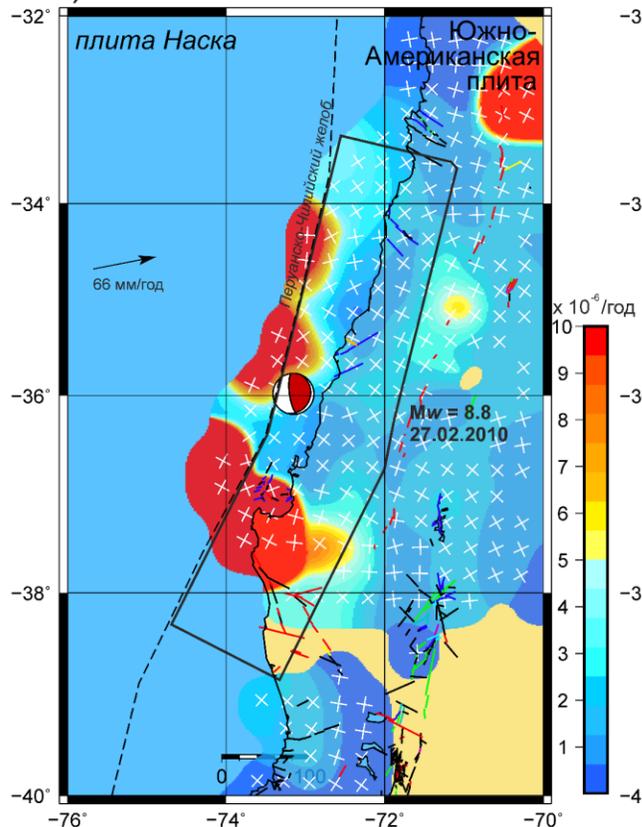
Поле скорости вращений, рассчитанное за годовые интервалы. Цветными линиями показаны разломы разных типов: красный – взброс, синий – сброс, зелёный – правосторонний сдвиг, фиолетовый – правосторонний сдвиг-взброс, черный – тип не определён.

Оценки максимальной скорости деформации сдвига, Мауле 2010 г.

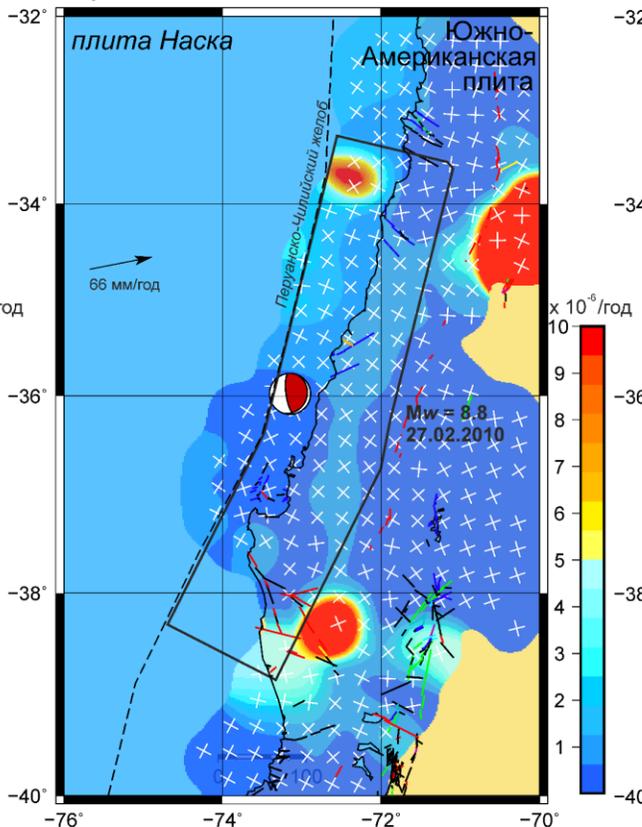
а) 27.02.2009-26.02.2010



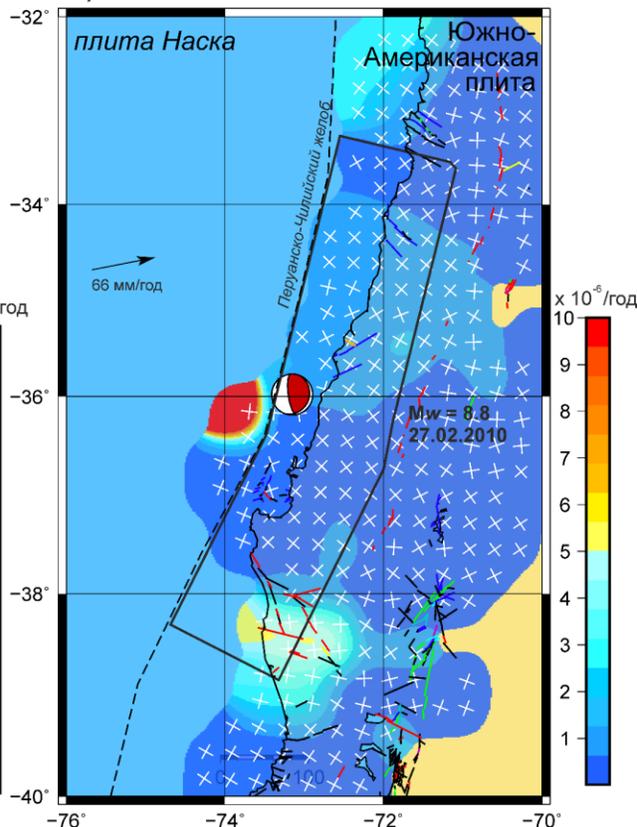
б) 27.02.2010-26.02.2011



в) 27.02.2011-26.02.2012



г) 27.02.2012-26.02.2013

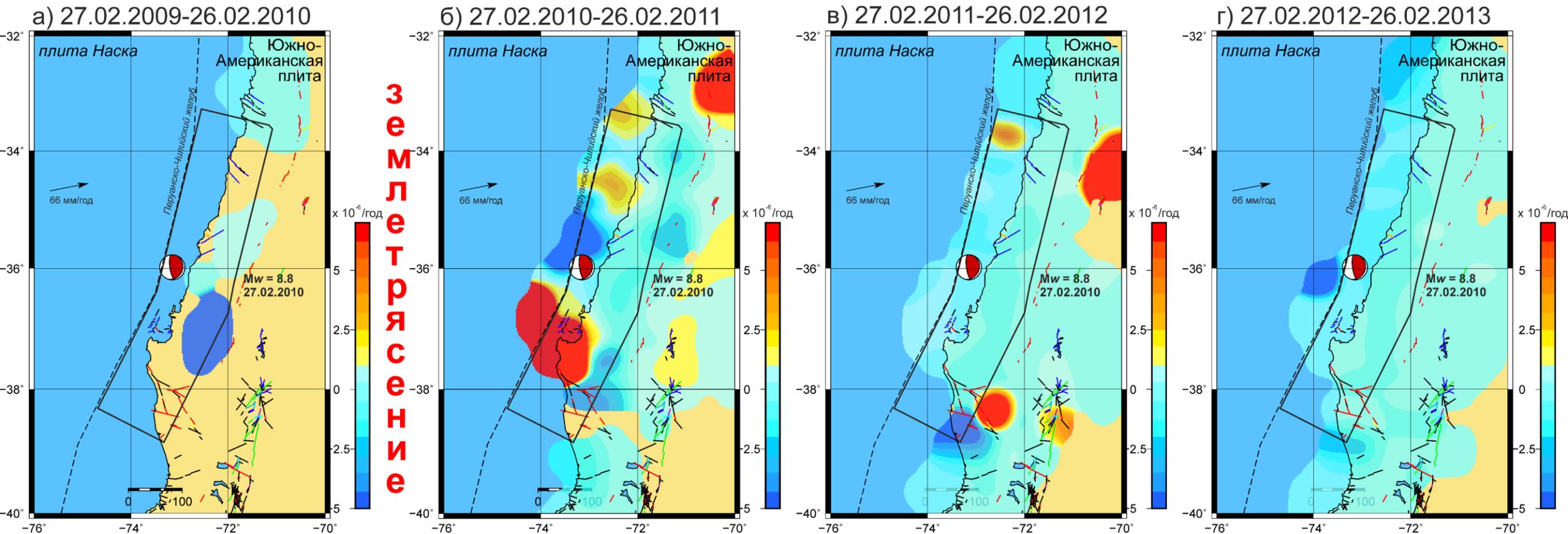


**З
Е
М
Л
Е
Т
Р
Я
С
Н
И
Е**

Поле скорости максимальной деформации сдвига, рассчитанное за годовые интервалы. Белые черточки показывают направление осей скорости максимальной деформации сдвига. Цветными линиями показаны разломы разных типов:

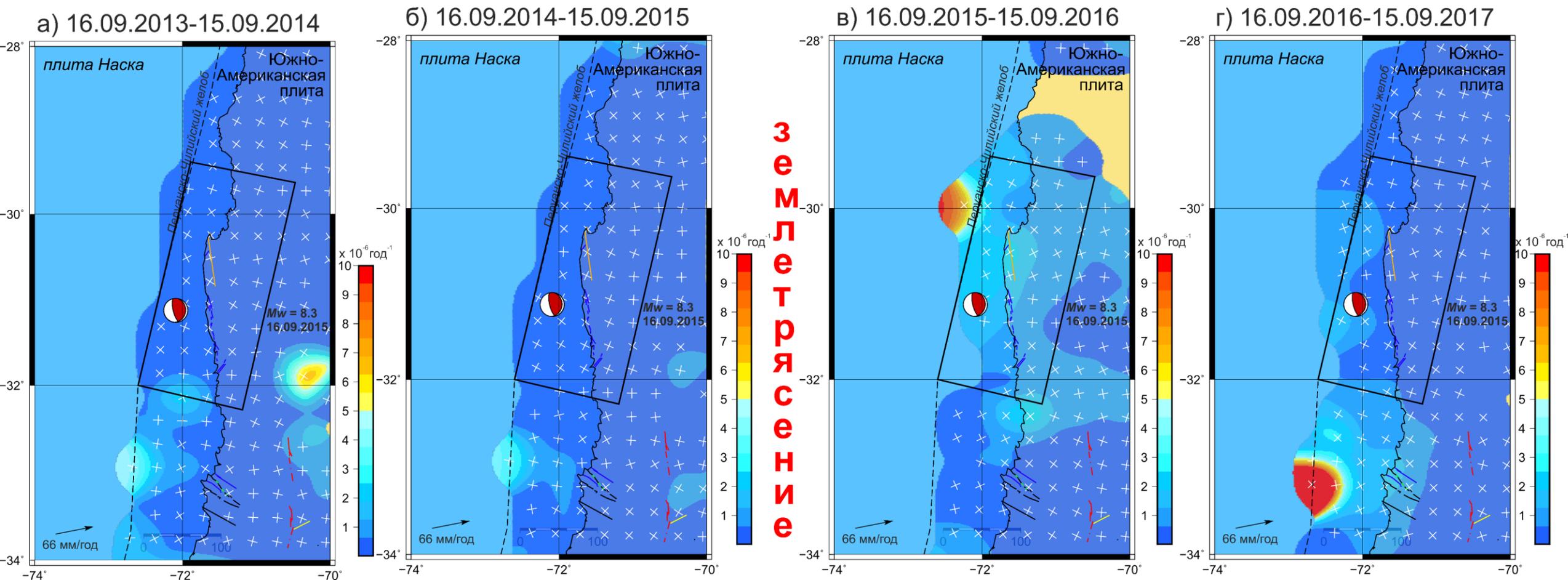
красный – взброс, синий – сброс, зелёный – правосторонний сдвиг, светло-оранжевый – левосторонний сдвиг, фиолетовый – правосторонний сдвиг-взброс, жёлтый – взброс-правосторонний сдвиг, тёмно-оранжевый – левосторонний сдвиг-взброс, тёмно-бирюзовый – сброс-правосторонний сдвиг, светло бирюзовый – правосторонний сдвиг-сброс, оранжевый – сброс-левосторонний сдвиг, черный – тип не определён.

Оценки скорости плоской дилатации, Мауле 2010 г.



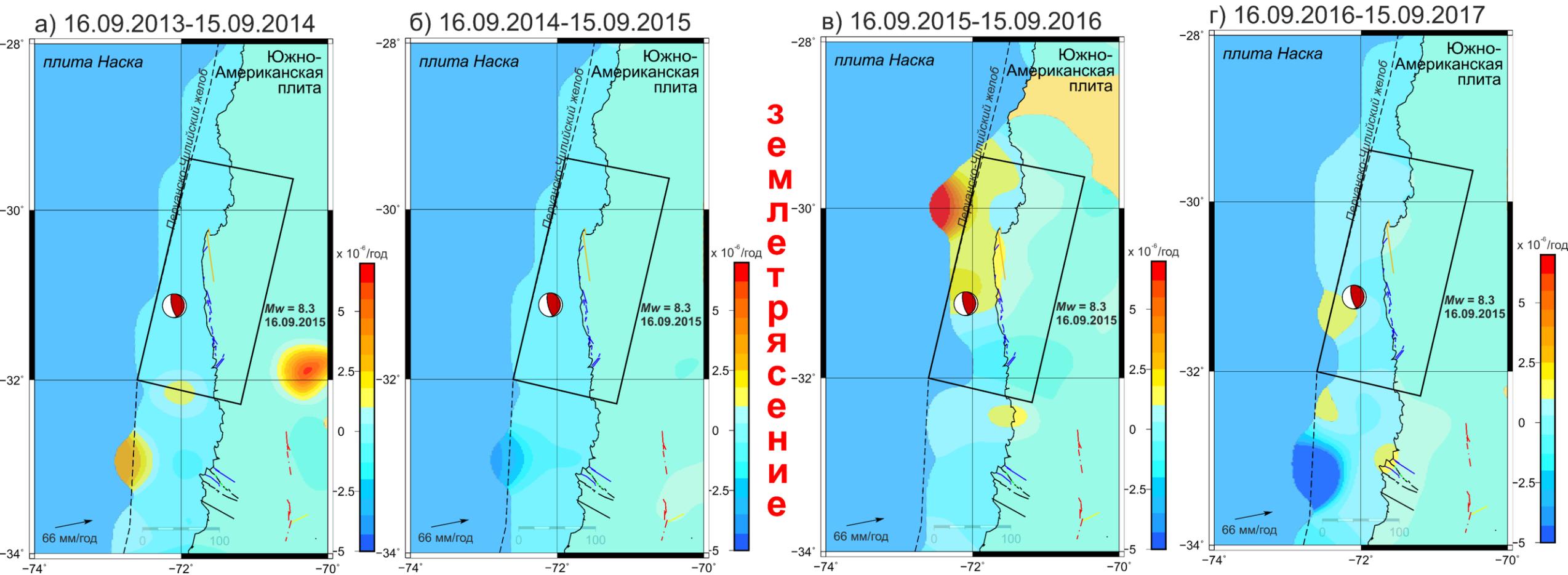
Поле скорости плоской дилатации, рассчитанное за годовые интервалы. Цветными линиями показаны разломы разных типов: красный – взброс, синий – сброс, зелёный – правосторонний сдвиг, светло-оранжевый – левосторонний сдвиг, фиолетовый – правосторонний сдвиг-взброс, жёлтый – взброс-правосторонний сдвиг, тёмно-оранжевый – левосторонний сдвиг-взброс, тёмно-бирюзовый – сброс-правосторонний сдвиг, светло-бирюзовый – правосторонний сдвиг-сброс, оранжевый – сброс-левосторонний сдвиг, черный – тип не определён.

Оценки максимальной скорости деформации сдвига, Ильяпель 2015 г.



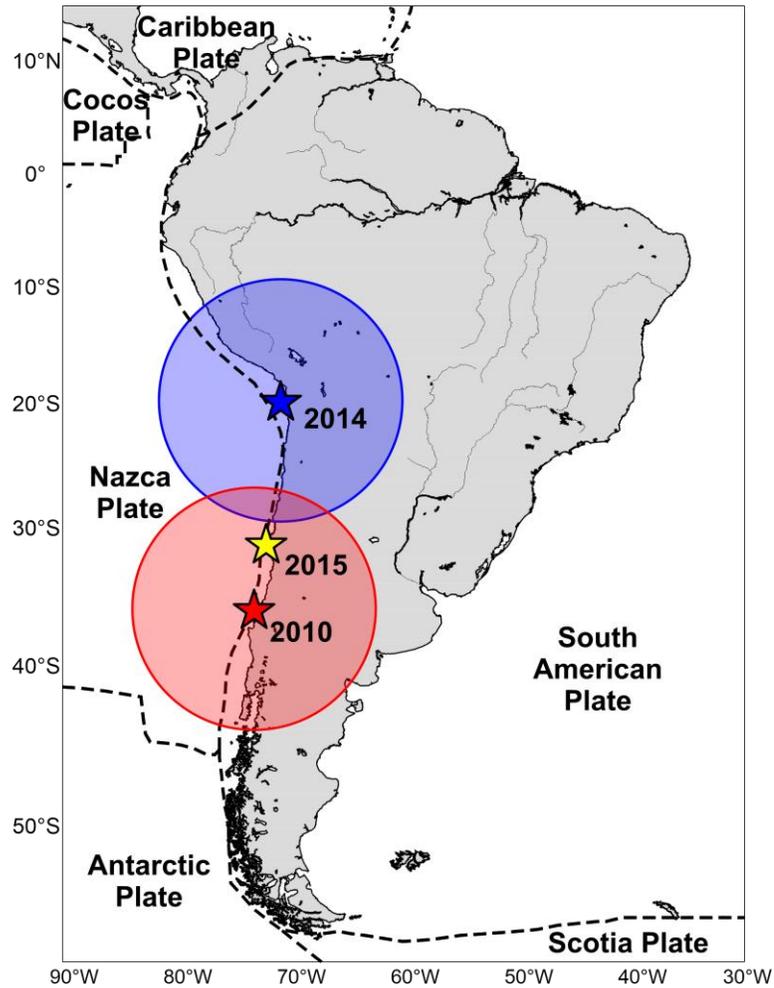
Поле скорости максимальной деформации сдвига, рассчитанное за годовые интервалы. Белые черточки показывают направление осей скорости максимальной деформации сдвига. Цветными линиями показаны разломы разных типов: красный – взброс, синий – сброс, зелёный – правосторонний сдвиг, оранжевый – сброс-левосторонний сдвиг, жёлтый – взброс-правосторонний сдвиг, черный – тип не определён.

Оценки скорости плоской дилатации, Ильяпель 2015 г.

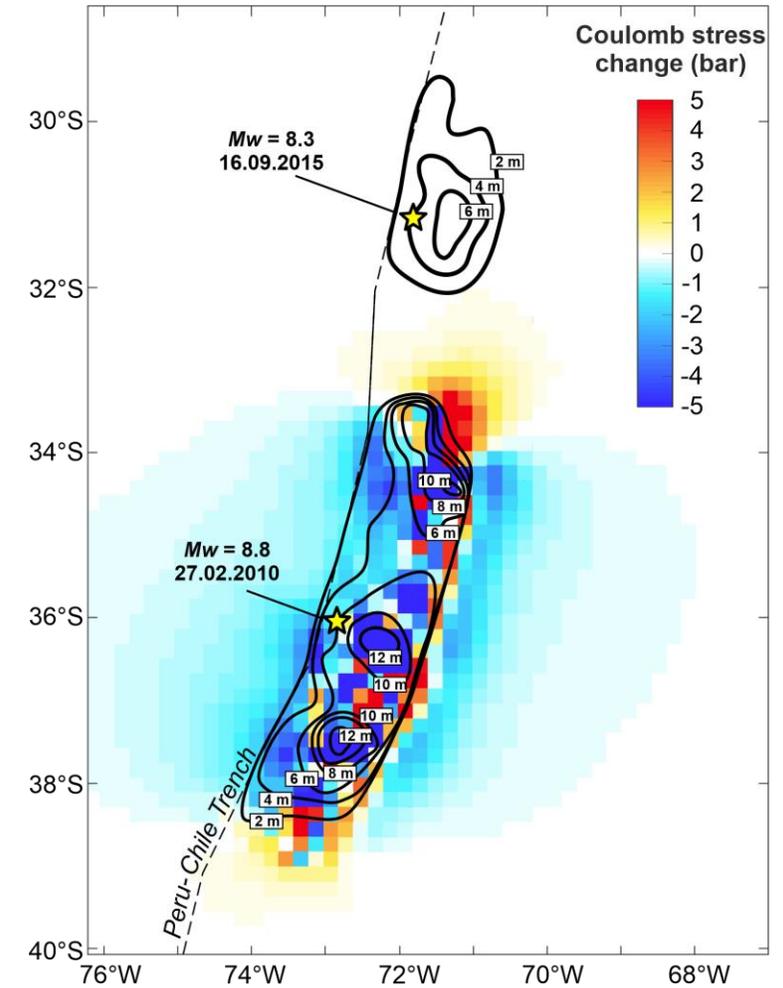
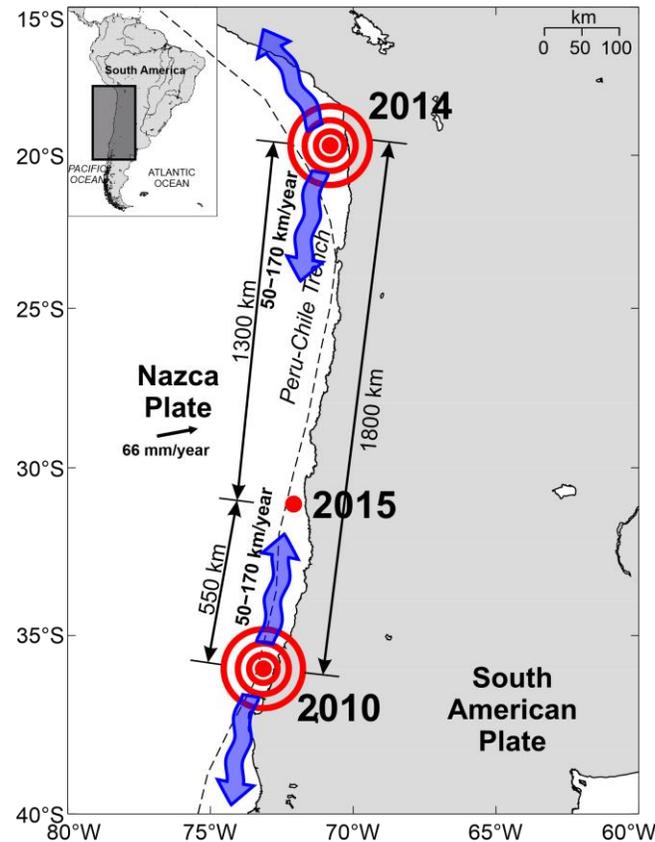
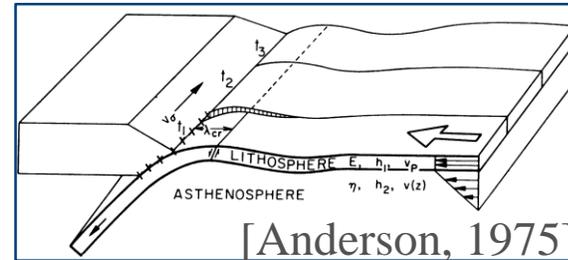


Поле скорости плоской дилатации, рассчитанное за годовые интервалы. Цветными линиями показаны разломы разных типов: красный – взброс, синий – сброс, зелёный – правосторонний сдвиг, оранжевый – сброс-левосторонний сдвиг, жёлтый – взброс-правосторонний сдвиг, черный – тип не определён.

Взаимодействие землетрясений



[Кальметьева З.А., Юдахин Ф.Н., 1994]



[Toda et al., 2005; Lin and Stein, 2004]

Основные результаты

- Направление одной из осей скорости максимальной деформации сдвига субпараллельно направлению субдукции, поскольку характер деформирования рассматриваемой области по большей части определяется процессом погружения плиты Наска под Южно-Американскую плиту.
- Направление одной из осей скорости максимальной деформации сдвига субпараллельно простиранию региональных разломов, секущих край Южно-Американской плиты. Однако выраженного влияния региональных разломов на вариации полей скорости деформации в данном случае не выявлено. Вероятно, это связано с тем, что пункты ГНСС-наблюдений на Чилийском побережье расположены на достаточно больших расстояниях друг от друга, что не позволяет проследить эффекты более мелкого масштаба.
- Местоположение очагов приурочено к градиентным зонам поля деформации земной коры.
- В деформационном поле выделены аномалии, связанные с подготовкой сильнейших землетрясений и релаксацией среды после них. Наличие неоднородностей в деформационном поле подчеркивает неравномерный характер движения земной коры.

Спасибо за внимание!