



УДК :550.82

А. В. Кирюхин<sup>1</sup>, С. А. Федотов<sup>1</sup>, П. А. Кирюхин<sup>2</sup>

<sup>1</sup> *Институт вулканологии и сейсмологии ДВО РАН,  
г. Петропавловск-Камчатский*

<sup>2</sup> *ООО «Экспиджен Сервисис», Санкт-Петербург*

## Геомеханическая интерпретация локальной сейсмичности, предшествовавшей извержению Толбачинского вулкана 27 ноября 2012 г.

По данным из каталога локальных землетрясений КФ ГС РАН в районе Толбачинских вулканов выделяется 22 плоско-ориентированных кластера землетрясений, предшествующих извержению вулкана 27 ноября 2012 г. Выявленные плоскости интерпретируются как трещины гидроразрыва при инъекции магмы. Исходя из указанной интерпретации, извержению Толбачинского вулкана предшествовало внедрение серии даек запад-север-западного простирания в диапазоне глубин  $-4$  —  $+3$  км абс. в зоне к юго-востоку от постройки вулкана Плоский Толбачик в условиях доминирования вертикальных напряжений. Это привело к смене геомеханического состояния: возрастанию горизонтальных напряжений север-восток-северного направления и формированию условий для инъекции силлов (0 км абс.) и магмовыводящей дайки север-восток-северного простирания.

### Введение

Последнее трещинное извержение на южном склоне Толбачинского вулкана началось 27 ноября 2012 г. и продолжалось в течение 9-ти месяцев. Это извержение существенно обновило ландшафт вулкана после Большого Трещинного Толбачинского Извержения 1975–1976 [1]. Геодеформационные изменения в процессе извержения 2012–2013 гг. оценивались с использованием повторных радарных спутниковых съёмок (interferometric synthetic aperture radar (InSAR)), при этом использованы данные Canadian Space Agency's RADARSAT-2 и Italian Space Agency's COSMO-SkyMed [2]. По климатическим условиям (снежный покров) сравнение интерферограмм возможно только для съёмок августа-сентября 2012 и 2013 гг. 3D геомеханическая модель описывает наблюдаемые за рассматриваемый интервал времени (год) деформации как результат горизонтального растяжения в результате внедрения радиальной дайки Толбачинского вулкана (угол падения  $80^\circ$  в запад-север-западном направлении) [2].

Измерения параметров открытых трещин в районе извержения в сентябре 2013 г. показывают преобладание трещин северо-запад-северного простирания, а также выявлены полигональные открытые трещины на склонах конуса Клешня (к югу от основного эруптивного центра). Полигональные открытые трещины указывают на условия радиального растяжения, что возможно при значительном превышении вертикального стресса над горизонтальным ( $S_v > Sh_{max} = Sh_{min}$ , [3]). Таким образом, хотя геомеханическая модель с одной дайкой может объяснить суммарный геодеформационный эффект,

но она вряд ли адекватно описывает последовательность внедрений магматических тел, предшествующих извержению 27 ноября 2012 г.

В связи с этим рассмотрим возможности использования данных по локальной сейсмичности для восстановления последовательности инъекции магмы перед извержением Толбачинского вулкана.

### Использование параметров трещин гидроразрыва при инъекции флюидов для оценки напряженного состояния резервуара

Данные по нагнетанию (инъекции) флюидов в скважины на нефтяных, газовых и геотермальных месторождениях широко используются для оценки напряженного состояния массива. Многочисленные экспериментальные данные показывают, что плоскость трещины гидроразрыва ориентируется перпендикулярно к оси минимальных напряжений. Для описания напряженного состояния горного массива используются три главных напряжения: вертикальный стресс ( $S_v$ ), максимальный горизонтальный стресс ( $Sh_{max}$ ) и минимальный горизонтальный стресс ( $Sh_{min}$ ) [3]. Применительно к инъекции магмы в питающей системе вулкана можно предположить, что в условиях горизонтального растяжения земной коры (рифтовые зоны, грабены,  $S_v > Sh_{max} > Sh_{min}$ ) преимущественно будут формироваться дайки, в зонах горизонтального сжатия земной коры (горсты,  $Sh_{max} > Sh_{min} > S_v$ ) — более благоприятные условия для внедрения силлов. Необходимо также учитывать, что инъекция магмы может вызывать изменения напряженного состояния в окрестности вулканического аппарата в процессе подготовки и извержения вулкана, т. е.

**Таблица 1.** Выделенные кластеры землетрясений и параметры аппроксимирующих плоскостей.  $X$ ,  $Y$ ,  $Z$  – координаты центров кластеров.

№ кластера	Угол падения град	Азимут падения град.	$X$ м	$Y$ м	$Z$ м абс	DD/MM/YY HH:MM	Число землетрясений в кластере
18	80	137	588 041	6 185 570	-2369	25/11/12 10:56	8
19	25	230	589 355	6 185 175	-3256	25/11/12 20:29	27
20	44	148	588 412	6 185 393	-2422	25/11/12 22:00	19
21	32	250	588 749	6 185 321	-2893	26/11/12 1:12	28
22	58	74	588 183	6 185 916	-1727	26/11/12 6:06	27
23	77	209	587 489	6 186 380	-1887	26/11/12 6:59	31
24	62	6	588 037	6 185 744	-2536	26/11/12 9:29	17
25	42	112	587 506	6 185 373	-3030	26/11/12 15:12	9
26	46	233	587 490	6 186 646	-1162	26/11/12 17:02	11
27	52	138	588 833	6 185 808	-1454	26/11/12 18:50	20
28	27	245	589 936	6 184 132	-3135	26/11/12 19:51	17
29	61	53	587 366	6 185 779	-263	26/11/12 20:58	12
30	59	20	586 981	6 185 946	-818	26/11/12 23:04	12
31	62	208	589 346	6 185 416	-1780	26/11/12 23:16	13
32	63	18	587 227	6 186 504	-797	26/11/12 23:45	7
33	60	197	588 391	6 186 634	-2127	27/11/12 0:19	7
34	75	192	585 967	6 186 785	-2147	27/11/12 0:38	6
35	74	213	591 075	6 183 134	-1053	27/11/12 2:26	6
36	83	98	589 811	6 184 397	-1122	27/11/12 3:16	6
37	3	135	589 307	6 183 391	-177	27/11/12 3:55	9
38	55	300	583 378	6 183 079	302	27/11/12 5:35	6
39	7	196	583 269	6 181 414	-35	27/11/12 7:09	12

реализация инъекции магмы (дайка или силл) зависит от времени. Создание трещин гидроразрыва сопровождается микросейсмичностью, связанной с активизацией сдвиговых трещин в примыкающей к основной трещине гидроразрыва зоне. Поэтому можно предполагать, что ориентация плоскостей, аппроксимирующих кластеры микроземлетрясений совпадает с трещинами гидроразрыва при инъекции (внедрении) магмы.

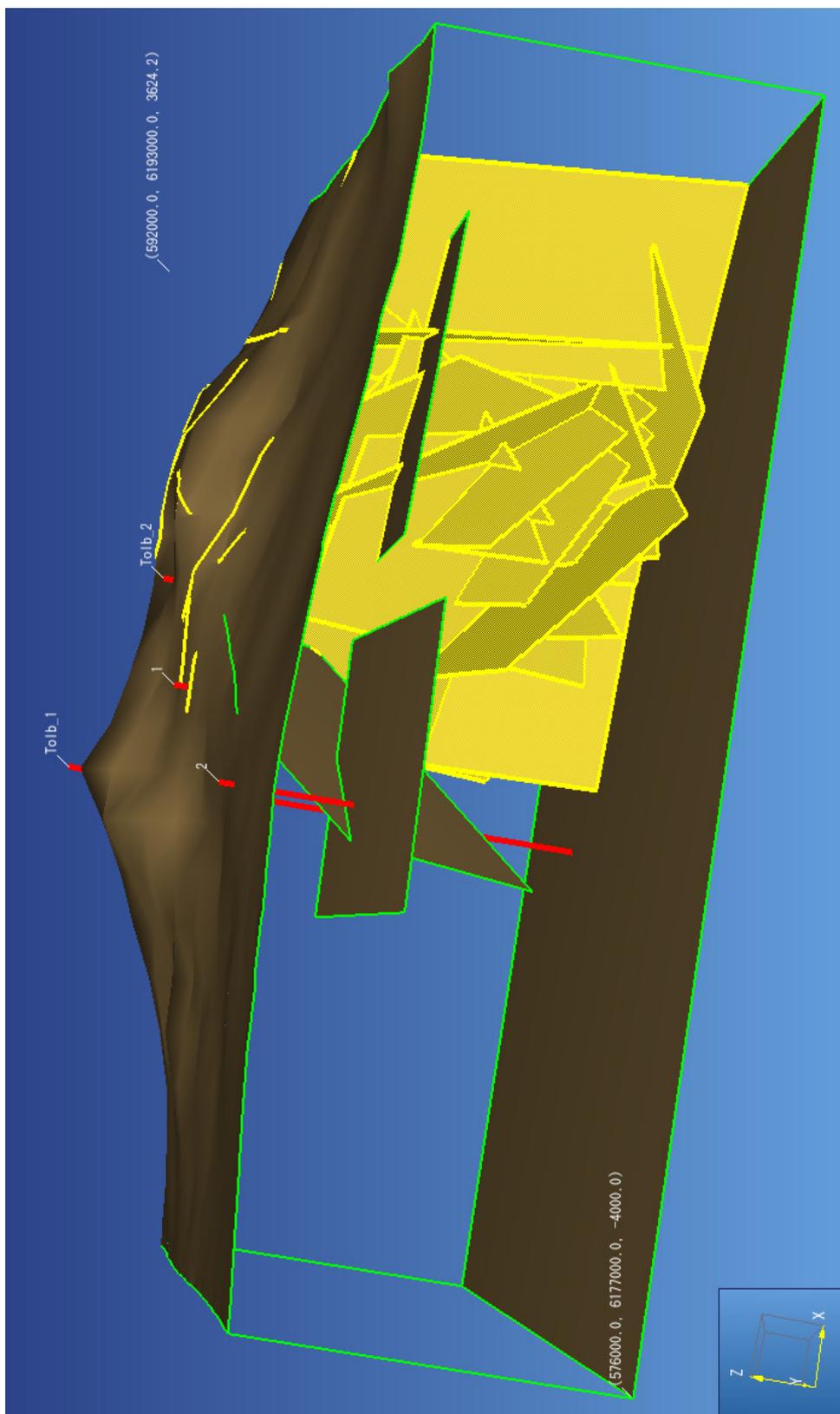
#### Алгоритм выбора кластеров микроземлетрясений и их геометрические характеристики

По данным из каталога локальных землетрясений КФ ГС РАН в районе Толбачинских вулканов выделяется 22 плоско-ориентированных кластера землетрясений, предшествующих извержению вулкана 27 ноября 2012 г., критериями сравнения для включения нового объекта в кластер были выбраны 1) Близость по времени (1 сутки); 2) Близость по расстоянию в горизонтальной плоскости (до 6 км); 3. Близость к плоской ориентации (расстояние от объекта до плоскости не более 200 м). Далее анализировались только кластеры с числом элементов более 5.

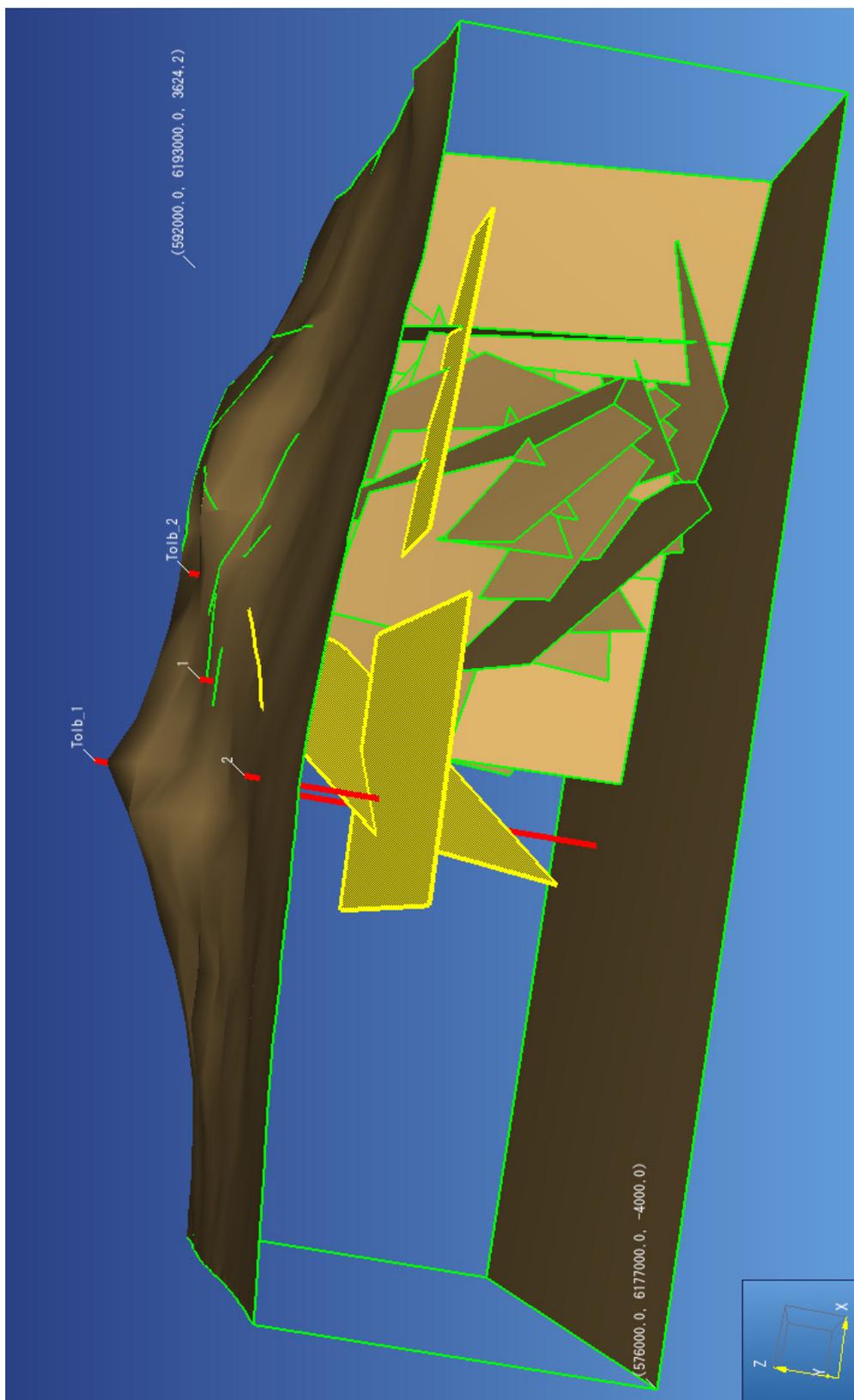
В табл. 1 приводятся результаты выделения плоско-ориентированных кластеров землетрясений с учётом критериев, изложенных выше, а также структурно-геологические характеристики соответствующих плоскостей (угол падения, азимут падения, координаты центров кластеров, время реализации и число землетрясений).

#### Геомеханическая интерпретация: последовательность инъекции магмы 25 – 27 ноября 2012 г.

Выявленные плоско-ориентированные кластеры землетрясений интерпретируются как трещины гидроразрыва при инъекции магмы. Если это предположение справедливо, то извержению Толбачинского вулкана предшествовало около двадцати внедрений магмы (преимущественно даек запад-северо-западного простирания) в диапазоне глубин  $-4 \div +3$  км абс. в зоне к юго-востоку от постройки вулкана Плоский Толбачик (табл. 1 кластеры землетрясений 18–36, рис. 1). Это привело к смене геомеханического состояния: возрастанию горизонтальных напряжений север-восток-северного направления и формированию условий для инъекции двух силлов (0 км абс.) и магмовыводящей дайки



**Рис. 1.** Ориентация трещин гидроразрыва (по результатам интерпретации данных локальной сейсмичности КФ ГС РАН), предшествующих извержению Толбачинского вулкана 27 ноября 2012 г. Подсветкой выделены трещины гидроразрыва образовавшиеся на начальном этапе при доминировании вертикальных напряжений (геомеханические условия NF:  $S_v > S_{hmax} > S_{hmin}$ ). Tolb\_1 — Острый Толбачик, Tolb\_2 — Плоский Толбачик, 1 — кратер Меняйлова, 2 — кратер Набоко.



**Рис. 2.** Ориентация трещин гидроразрыва (по результатам интерпретации данных локальной сейсмичности КФ ГС РАН), предшествующих извержению Толбачинского вулкана 27 ноября 2012 г. Подсветкой выделены трещины гидроразрыва (два силла и магмовыводящая дайка) образовавшиеся непосредственно перед извержением при доминировании горизонтальных напряжений север-восток-северного направления (геомеханические условия:  $Sh_{max} \gg Sv = Sh_{min}$ ). Tolb\_1 — Острый Толбачик, Tolb\_2 — Плоский Толбачик, 1 — кратер Менийлова, 2 — кратер Набоко.

север-восток-северного простирания (табл. 1 кластеры землетрясений 37–39, рис. 2), в результате чего началось извержение Толбачинского вулкана 27 ноября 2012 г.

Работа выполнена при поддержке РФФИ по проектам 12–05–00 125 и 15–05–00 676.

#### Список литературы

1. Fedotov S. A., Balesta S. T., Dvigalo V. N., Razina A. A., Flerov G. B., Chirkov A. M. New Tolbachik Volcanoes in Active Volcanoes of Kamchatka. Vol. 1. Nauka Publishers, Moscow, 1991. P. 275–279. (in Russian)
2. Lundgren P., Kiryukhin A., Milillo P., Samsonov S.. Dike model for the 2012–2013 Tolbachik eruption constrained by satellite radar interferometry observations. J. Volcanology Geothermal Research. 2015. 35 p.
3. Zoback, M.D. Reservoir Geomechanics. Cambridge University Press, 2010. 448 p.