

## **ИСТОЧНИКИ ПИТАНИЯ СУПЕРВУЛКАНА ТОБА ПО СЕЙСМИЧЕСКИМ ДАННЫМ**

### ***Екатерина Владимировна Касаткина***

Институт нефтегазовой геологии и геофизики им. А. А. Трофимука СО РАН, 630090, Россия, г. Новосибирск, пр. Академика Коптюга, 3, лаборант лаборатории сейсмической томографии; Новосибирский государственный университет, 630090, Россия, г. Новосибирск, ул. Пирогова, 2, студентка, тел. (383)330-92-01, e-mail: KasatkinaEV@ipgg.sbras.ru

### ***Иван Юрьевич Кулаков***

Институт нефтегазовой геологии и геофизики им. А. А. Трофимука СО РАН, 630090, Россия, г. Новосибирск, пр. Академика Коптюга, 3, доктор геолого-минералогических наук, зав. лабораторией сейсмической томографии; Новосибирский государственный университет, 630090, Россия, г. Новосибирск, ул. Пирогова, 2, старший преподаватель кафедры геофизики, тел. (383)330-92-01, e-mail: KoulakovIY@ipgg.sbras.ru

### ***Александр Николаевич Василевский***

Институт нефтегазовой геологии и геофизики им. А. А. Трофимука СО РАН, 630090, Россия, г. Новосибирск, пр. Академика Коптюга, 3, научный сотрудник, лаборатория сейсмической томографии, Новосибирский государственный университет, 630090, Россия, г. Новосибирск, ул. Пирогова, 2, старший преподаватель кафедры геофизики, тел. (383)330-92-01, e-mail: VasilevskiyAN@ipgg.sbras.ru

На протяжении последних миллионов лет в кальдере вулкана Тоба произошло несколько крупных извержений. Наиболее мощным и крупнейшим в голоцене стало суперизвержение, произошедшее 74 000 лет назад и приведшее к выбросу 2800 км<sup>3</sup> вулканического материала. Это извержение вызвало длительную смену климата на Земле, а также стало причиной изменения направления расселения людей на планете. Мы предполагаем, что главной причиной извержений вулкана Тоба стала субдукция под Зондскую плиту хребта Исследователей (IFZ), который представляет собой крупную разломную водонасыщенную зону. Наша томографическая модель позволяет надежно выявить питающую систему вулкана Тоба, а также выделить в ней несколько уровней накопления магмы. Полученные результаты говорят об активности питающей системы вулкана в настоящее время и о возможной ее активизации в будущем.

**Ключевые слова:** сейсмология, сейсмическая томография, супервулканизм, вулкан Тоба, скоростная модель.

## **TOBA SUPERVOLCANO FEEDING SOURCES INFERRED BY SEISMIC DATA**

### ***Ekaterina V. Kasatkina***

Trofimuk Institute of Petroleum Geology and Geophysics SB RAS, 630090, Russia, Novosibirsk, Koptyug Prospect 3, BSc, Assistant, Laboratory of seismic tomography; Novosibirsk State University, 630090, Russia, Novosibirsk, Pirogova Str. 2, student, tel. (383)330-92-01, e-mail: KasatkinaEV@ipgg.sbras.ru

### ***Ivan Y. Koulakov***

Trofimuk Institute of Petroleum Geology and Geophysics SB RAS, 630090, Russia, Novosibirsk, Koptyug Prospect 3, Doctor of Science, Head of the Laboratory of seismic tomography; Novosi-

Novosibirsk State University, 630090, Russia, Novosibirsk, Pirogova Str. 2, Senior teacher Chair of Geophysics, tel. (383)330-92-01, e-mail: KoulovIY@ipgg.sbras.ru

**Alexander N. Vasilevsky**

Trofimuk Institute of Petroleum Geology and Geophysics SB RAS, 630090, Russia, Novosibirsk, Koptug Prospect 3, Researcher, Laboratory of seismic tomography, Novosibirsk State University, 630090, Russia, Novosibirsk, Pirogova Str. 2, Senior teacher Chair of Geophysics, tel. (383)330-92-01, e-mail: VasilevskiyAN@ipgg.sbras.ru

During the last millions of years, there were several large eruptions in the Toba volcano caldera. The most powerful and the largest in the Holocene was a super eruption that occurred 74,000 years ago and contributed to the release of 2,800 km<sup>3</sup> of volcanic material. This eruption caused the long-term climate change on Earth, and caused the changing of the direction of human settlement on the planet. We assume that the main reason of Toba eruptions was the subduction of the Investigator ridge (IFZ) which is a large water saturated fracture zone. Our tomographic model allows to reliably identify the Toba volcano feeding system and to identify in it several levels of magma accumulation. The obtained results show the activity of the volcano feeding system at the present and the possibility of new eruptions in the future.

**Key words:** seismology, seismic tomography, supervolcanoes, Toba volcano, velocity model.

Кальдера вулкана Тоба расположена в центральной части Северной Суматры и является местом нескольких крупных извержений. Последнее суперизвержение вулкана произошло 74 000 лет назад, и оно считается самым крупным в Голоцене извержением на Земле. Выброс вулканического материала в твердом эквиваленте составил около 2800 км<sup>3</sup> и существенно повлиял на глобальную биосферу и климат. Если такое извержение произошло бы в наше время, оно бы радикально изменило жизнь людей на Земле в течение нескольких поколений. Поэтому нам важно понять принципы функционирования магматической системы, питающей этот супервулкан.

Кальдера вулкана Тоба является частью Зондской дуги, где Индо-Австралийская плита погружается под Зондскую плиту под углом со скоростью около 56 мм/год. В различных зонах субдукции присутствуют следы кальдерообразующих извержений, однако интенсивность и повторяемость извержений вулкана Тоба делает его уникальным.

Рисунок 1, А показывает, что кальдера вулкана Тоба находится на продолжении Хребта исследователей (IFZ), который представляет собой трансформную зону в Индийском океане длиной около 2500 км и отделяет более молодой западный сегмент океанической плиты от восточного сегмента [1]. IFZ состоит из нескольких параллельных хребтов, достигающих высоты 1500 м по отношению к окружающему морскому дну. На карте видно, что в области стыка между IFZ и Зондским желобом морфология аккреционного комплекса значительно отличается от других сегментов желоба, что может быть объяснено более сильным сжатием вышележащей плиты [2]. Сейсмичность в зоне погружения слэба образует в мантии линейную структуру, направленную непосредственно под кальдеру Тоба. Аналогичное распределение сейсмичности ранее описывали Fauzi и др. [3], которые провели анализ землетрясений, зарегистрированных на локальных и региональных сетях. Эти авторы предположили, что IFZ "служит

местом сфокусированного высвобождения летучих из слэба в клин вышележащей мантии".

Увеличенный фрагмент области кальдеры с относящейся к слэбу сейсмичностью показан на рис. 1, В.

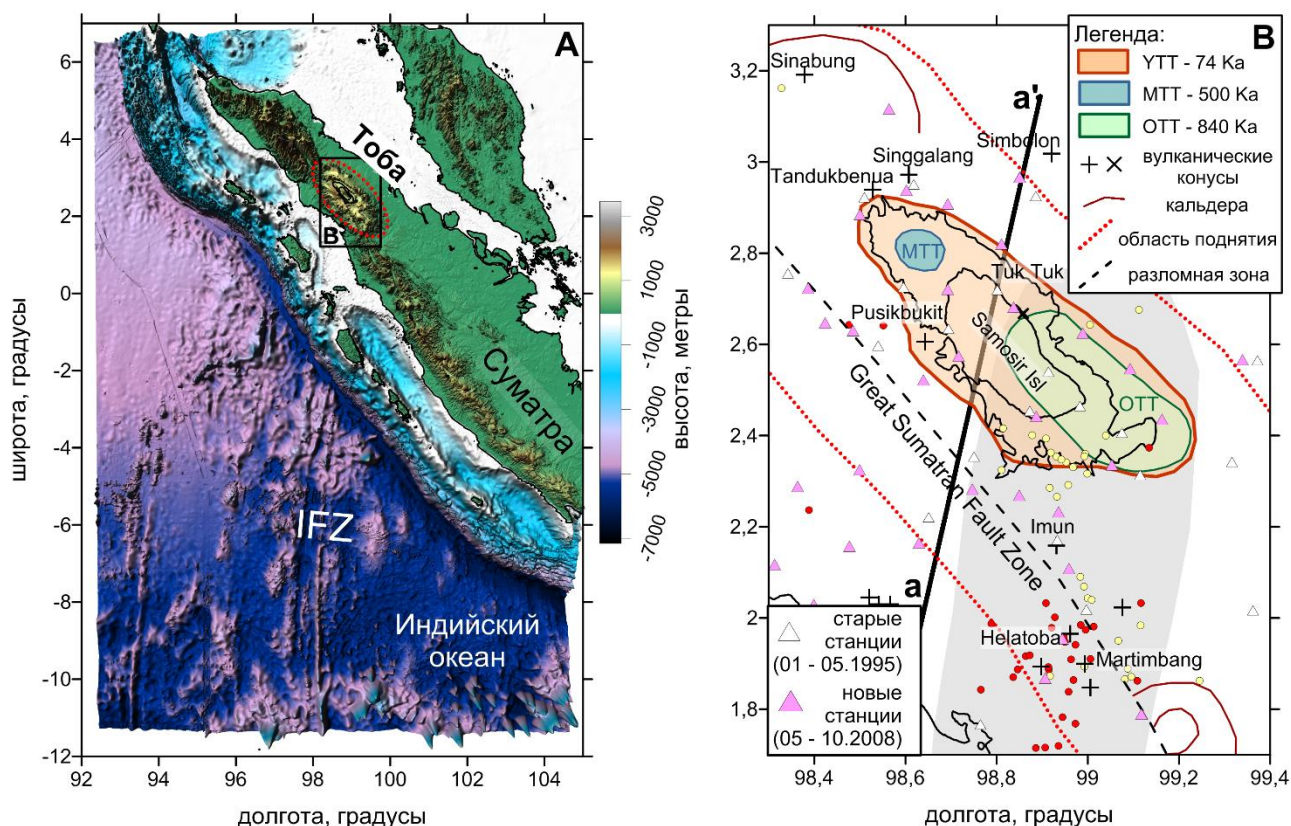


Рис. 1. Топография, система наблюдения и основные структуры исследуемой области: А – батиметрическая карта положения хребта исследователей (IFZ) по отношению к кальдере вулкана Тоба; В – положение основных структур, сейсмических станций и землетрясений в области кальдеры; Great Sumatran Fault Zone – Суматранская разломная зона; ОТТ, МТТ, и YTT – Old, Middle и Young Toba Tuffs соответственно – основные кальдеры, образованные за время действия вулкана; линия а - а' показывает направление вертикального сечения

В настоящей работе мы представляем новую томографическую модель, полученную путем совместной обработки времен прихода  $P$ - и  $S$ -волн двух наборов данных – старого (эксперимент 1995 г.) и нового (эксперимент 2008 г.). Вступления были зарегистрированы на 40 и 42 станций в каждом эксперименте, а общее количество лучей составило 6644 и 5240 для  $P$ - и  $S$ -волн соответственно. Томографическая инверсия проводилась с использованием алгоритма LOTOS [4]. В качестве начальной была выбрана скоростная модель, полученная в предыдущем исследовании [5], основанном только на наборе данных более раннего эксперимента. Все результаты, полученные в настоящей работе, были проверены с помощью ряда синтетических тестов. В результате была получена трехмерная скоростная модель исследуемого региона.

Было обнаружено, что аномалии скоростей  $P$ - и  $S$ -волн хорошо коррелируют между собой. На рисунке 2 мы приводим результаты инверсии для  $S$ -модели, так как считаем ее более репрезентативной из-за большей чувствительности  $S$ -волн к температуре и флюидонасыщенности. Мы предполагаем, что исходные магмы образуются на глубине около 150 км, где имеется аномальное выделение летучих из субдуцируемой зоны хребта Исследователей, которая имеет более толстую кору и является более водонасыщенной, чем "нормальная" океаническая литосфера [3, 6]. При проникновении в мантийный клин флюиды могут реагировать с перидотитами и трансформировать их в флогопит или амфиболсодержащие породы, которые характеризуются более низкими температурами плавления [7]. Восходящие частично расплавленные потоки магмы проявляются как низкоскоростные сейсмические аномалии. На глубинах 30-50 км эти потоки образуют большой резервуар (basic magma reservoir на рис. 2). Высокая амплитуда отрицательной аномалии  $S$ -волн и менее интенсивная аномалия  $P$ -волн предполагают наличие значительных количеств расплава внутри этого резервуара.

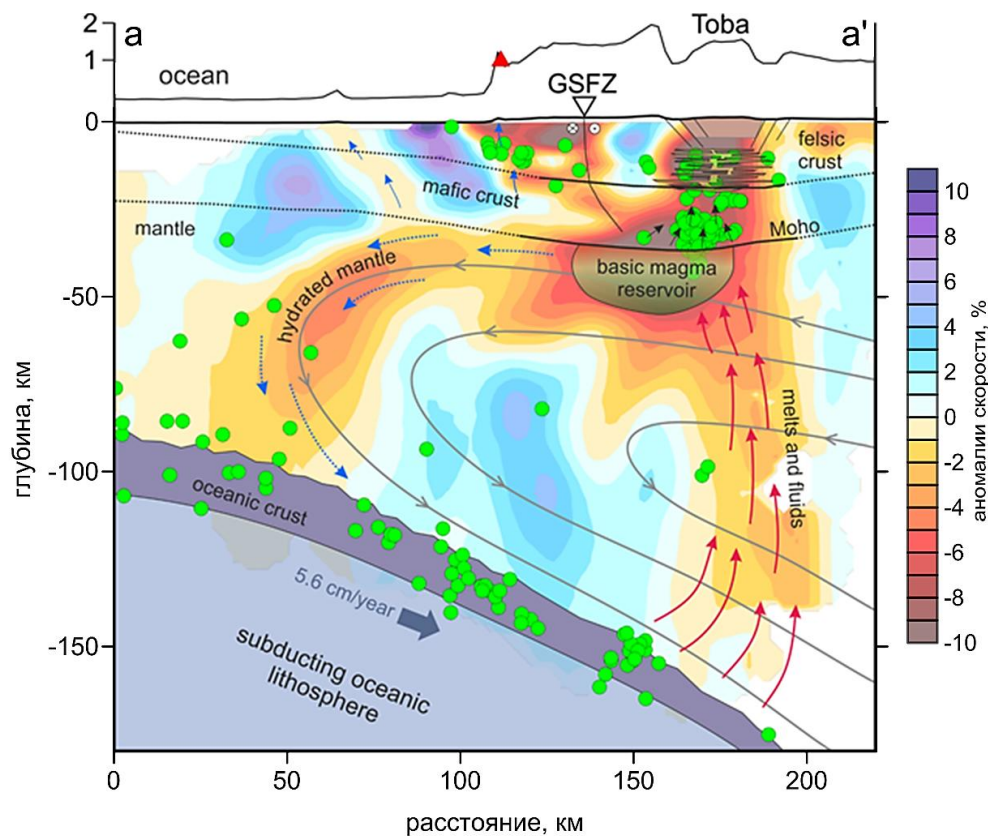


Рис. 2. Результаты инверсии и схематичная интерпретация полученных результатов на вертикальном сечении. Положение сечения в пространстве показано на рис 1, В; треугольник показывает положение вулканического комплекса на линии берега; GSFZ – Суматранская разломная зона; крупные точки маркируют землетрясения; сплошными стрелками показаны направления движения флюидов и расплавов, пунктирными – потоки гидратированной магмы; границы под вулканом (сплошные линии) приведены по результатам метода функции приемника [8]

Дифференцированные легкие и летучие фракции из резервуара у основания коры обладают достаточной плавучестью, чтобы подняться в верхнюю часть коры и образовать там неглубокий резервуар кислой магмы. Именно эти фракции могут выступать в качестве прямого источника для суперизвержений.

Исследования выполнялись при поддержке проектов РНФ 14-17-00430 и РФФИ 16-35-00099.

#### БИБЛИОГРАФИЧЕСКИЙ СПИСОК

1. Müller R.D., Roest W.R., Royer J.-Y., Gahagan L.M., Sclater J.G. Digital isochrons of the world's ocean floor // *Journal of Geophysical Research: Solid Earth*. - 1997. Vol. 102. - N B2. - P. 3211-3214.

2. Kopp H., Weinrebe W., Ladage S., Barckhausen U., Klaeschen D., Flueh E.R., Papenberg C. Lower slope morphology of the Sumatra trench system // *Basin Research*. - 2008. - Vol. 20. - N 4. - P. 519-529.

3. Fauzi, McCaffrey R., Wark D., Sunaryo, Prih Haryadi P. Lateral variation in slab orientation beneath Toba Caldera, northern Sumatra // *Geophysical Research Letters*. - 1996. - Vol. 23. - N 5. - P. 443-446.

4. Koulakov I. LOTOS code for local earthquake tomographic inversion: benchmarks for testing tomographic algorithms // *Bulletin of the Seismological Society of America*. - 2009. - Vol. 99. - N 1. - P. 194-214.

5. Koulakov I.T., Yudistira B.G. Luehr, Wandono. P, S velocity and VP/VS ratio beneath the Toba caldera complex (Northern Sumatra) from local earthquake tomography // *Geophysical Journal International*. - 2009. Vol. 177. - N 3. - P. 1121-1139.

6. Maruyama S., Okamoto K. Water transportation from the subducting slab into the mantle transition zone // *Gondwana Research*. - 2007. - Vol. 11. - N 1. - P. 148-165.

7. Peacock S. A. Fluid processes in subduction zones // *Science*. - 1990. - Vol. 248. - N 4953. - P. 329-337.

8. Sakaguchi K., Gilbert H., Zandt G. Converted wave imaging of the Toba Caldera, Indonesia // *Geophysical research letters*. - 2006. Vol. 33. - N 20.

© *Е. В. Касаткина, И. Ю. Кулаков, А. Н. Василевский, 2016*