

УДК 528+551.21

ДЕФОРМАЦИИ РАЙОНА ВУЛКАНА ЭТНЫ ПО ДАННЫМ GPS ИЗМЕРЕНИЙ, ИНТЕРПРЕТАЦИЯ, СВЯЗЬ С РЕЖИМОМ ВУЛКАНИЗМА

© 2019 г. В. И. Кафтан^{1,2,3,*}, М. В. Родкин^{4,5,**}

¹Геофизический центр РАН

119269 Москва, ул. Молодежная, 3

²Аграрно-технологический институт РУДН

117198 Москва, ул. Миклухо-Макляя, 6

³Федеральный научно-технический центр геодезии, картографии и ИПД

125413 Москва, ул. Онежская, 26

⁴Институт теории прогноза землетрясений и математической геофизики РАН

117997 Москва, ул. Профсоюзная, 84/32

⁵Институт морской геологии и геофизики ДВО РАН

693022 Южно-Сахалинск, ул. Науки, 1Б

*e-mail: v.kaftan@gcras.ru

**e-mail: rodkin@mitp.ru

Поступила в редакцию 15.01.2018 г.

Представлены результаты исследования горизонтальных деформаций и вертикальных перемещений в районе активного вулкана Этны (остров Сицилия, Италия), полученных по данным наблюдений глобальных спутниковых навигационных систем в 2011–2017 гг. с интервалом регистрации одни сутки редко расположенными станциями региональной геодезической сети. Исследования Этны особенно важны в плане: 1) локализации вулкана в районе с высокой плотностью населения; 2) практически непрерывного режима извержений и 3) несоответствия расположения вулкана плитотектоническим построениям. Выявлены субрегиональные тенденции деформирования исследуемой территории. Деформации растяжений зарегистрированы не только в области вершинного кратера, но также и на значительном удалении от него в акватории Ионического моря. Последнее позволяет предположить существование обширной глубинной системы питания вулкана с источниками, значительно удаленными от вершинного активного кратера. Обсуждаются результаты геологических и геофизических исследований береговой части и акватории данного района. Демонстрируется целесообразность исследования деформаций по данным наблюдательных сетей пусть и с невысокой плотностью станций, но с большим охватом территории.

Ключевые слова: деформация земной поверхности, вертикальные движения, GPS, вулкан Этна, тектоника.

DOI: <https://doi.org/10.31857/S0203-03062019114-24>

ВВЕДЕНИЕ

Исследования движений и деформаций земной поверхности средствами глобальных навигационных спутниковых систем – ГНСС (в частности, GPS) имеют уже многолетнюю историю. При этом как объемы доступной для использования информации, так и полнота их анализа непрерывно возрастают. Важное место ГНСС наблюдения занимают в изучении процессов современного вулканизма. Обычно, при построении и эксплуатации наблюдательных ГНСС сетей в зонах вулканической активности ис-

следователи предпочитают располагать станции наблюдений по возможности ближе к области извержения, тем самым, в большей мере способствуя изучению последствий, а не причин процесса извержения. Ввиду ограничений на число станций наблюдения большинство наблюдательных сетей имеют локальный характер. ГНСС сети, охватывающие обширные территории площадью порядка десятков тысяч километров, используются значительно реже, чем локальные и не могут обеспечивать высокую плотность размещения станций. Однако использование более

разнесенных наблюдательных сетей позволяет замечать проявления важных субрегиональных источников деформаций, хотя при этом и происходит сглаживание и теряются детали поля деформаций.

Обширные наблюдательные геодезические сети в районах активного вулканизма использовались, например, на Камчатке, на территории бывшего СССР. Они создавались и развивались силами государственной службы геодезии и картографии. Интересные результаты были получены в связи с Большим трещинным Толбачинским извержением 1975–1976 гг. [Большое ..., 1984], где по данным высокоточных линейно-угловых наблюдений были выявлены значительные деформации растяжения и сжатия до и после эксплозивной деятельности вновь образовавшихся активных вулканических конусов на удалении от них на десятки километров. При этом наиболее показательными были изменения горизонтальной дилатации [Энман, 1984]. Вертикальные смещения пунктов геодезической сети продемонстрировали картину, хорошо согласующуюся с ходом горизонтальных деформаций дилатации [Кафтан, 1991]. Режимы изменчивости дилатации и вертикальных смещений демонстрировали наличие глубинных источников инфляции магмы, расположенных также и на заметном удалении от конуса вулкана.

Аналогичные результаты были получены при наблюдении за вулканом Карымский. Здесь также был определен источник дилатации, существенно удаленный от главного конуса вулкана и расположенный в акватории озера Карымское, заполняющего кальдеру древнего, не считавшегося активным, вулкана Академии Наук [Магуськин, Шароглазова, 1992; Магуськин, Левин, 2006]. На протяжении долгого времени существование и интерпретация этого экстремума подвергались критике, основанной на относительно низкой плотности наблюдательной сети. Но последующие события в виде сильного землетрясения с эпицентром в непосредственной близости от этого места и неожиданного извержения в области кальдеры вулкана Академии Наук, не проявившего активность за последние два тысячелетия [Муравьев и др., 1997], весомо подкрепили правдоподобность наличия здесь магматического очага, оказывающего влияние на удаленную вулканическую постройку вулкана Карымский.

Сегодня сети ГНСС наблюдений, оснащенные постоянно-действующими автономными станциями охватывают практически всю территорию Земли, и их количество постоянно возрастает. Накоплена важная информация о движениях и деформациях земной поверхности на протяжении десятилетий. Анализ накопленных данных

представляет немалый интерес в плане наблюдений за современной активностью вулканов. Одним из таких объектов является вулкан Этна (остров Сицилия, Италия), в последнее десятилетие проявляющий почти непрерывную эксплозивную и эффузивную деятельность.

Движения и деформации в районе Этны интенсивно исследуются с использованием ГНСС наблюдений. Наблюдения в течение полевых GPS кампаний 1994–1998 гг. обобщены в работе [Puglisi, Bonforte, 2004]. Исследования позволили выявить тенденцию роста дилатации по всей площади сети, а также предположить наличие нескольких взаимосвязанных магматических источников, расположенных на разных глубинах вблизи центра вулканической постройки. При этом обращено внимание на особо интенсивные деформационные процессы восточного склона вулкана.

Результаты следующего этапа работ, по данным за 1994–2011 гг., с использованием сети большего охвата обобщены в работе [Palano et al., 2012]; эти данные позволили осуществить анализ блоковой структуры региона.

Настоящее исследование посвящено анализу данных непрерывных GPS наблюдений по значительной части территории о-ва Сицилии и области Калабрии за период 2011–2017 гг., что позволило сопоставить тенденции деформационного режима в регионе с режимом извержений.

ИССЛЕДУЕМАЯ ТЕРРИТОРИЯ И НАБЛЮДАТЕЛЬНАЯ СЕТЬ

Вулкан Этна – один из наиболее активных вулканов мира расположен на восточном побережье острова Сицилия (Италия), омываемого Тирренским, Средиземным и Ионическим морями. Этна – крупный базальтовый стратовулкан высотой 3290 м и площадью основания 1570 км². Для вулкана характерны частые эксплозивные и эффузивные извержения [Апродов, 1982].

Природа и тектоническая позиция вулкана Этна не вполне ясны. Обычно полагают [Gvirtzman, Nur, 1999; Doglioni et al., 2001; Casula, Bianchi, 2016 и др.], что вулкан генетически связан со слабоактивной (медленной) зоной субдукции Ионической микроплиты на север, под Сицилию и Калабрию. Но зона эта выделяется весьма нечетко, в частности, выход зоны к поверхности не вполне надежно ассоциируют с надвигом и прогибом Гела Катания (рис. 1). Более убедительно о существовании зоны субдукции свидетельствует развитие к северу от Сицилии молодой Эолийской островной дуги с вулканами островодучного типа. Вулкан Этна расположен существенно южнее этой дуги и по характеру вулканизма не является

островодужным вулканом. Располагаясь на континентальной коре, он по продуктам вулканизма несет скорее черты вулканизма срединно-океанических хребтов и подводных гор [Gvirtzman, Nur, 1999]. В районе вулкана зона субдукции осложнена мощной поперечной структурой Мальтийского эскарпа (см. рис. 1). В пределах восточной Сицилии, к северу от вулкана Этна располагается Калабро-Пелоританский горный хребет, с юга равнина Катания и горы Иблеи [Bousquet, Lanzafame, 2004]. Вулкан расположен в окружении основных тектонических линейментов (прогиб Гела-Катания, и Апеннинский разлом) и граничит своим восточным флангом с Ионическим морем, где располагается окончание Мальтийского эскарпа [Bianca et al., 1999; Argnani, Bonazzi, 2005] (см. рис. 1). Если сопоставить область размещения вулкана Этна с классической структурой зон субдукции то оно весьма необычно. Вулкан размещается как бы в области преддугового склона и аккреционного клина.

Начиная с 2010 г. и по настоящее время извержения вулкана происходят почти непрерывно. По данным интернет-сайта Программы глобального вулканизма [<http://volcano.si.edu/volcano.cfm?vn=211060&vtab=Eruptions>] эруптив-

ная деятельность происходила в следующие интервалы: с 10 августа 2010 г. по 27 апреля 2013 г., с 03 сентября 2013 г. по 16 мая 2015 г., с 02 декабря 2015 г. по настоящее время. Т.е. в течение семи лет перерывы в активности вулкана не превышали полугода. При этом интенсивность извержения оставалась умеренной.

С целью мониторинга движений и деформаций земной поверхности в районе исследований была развернута система GPS наблюдений. Она представлена непрерывно действующими станциями, а также периодически определяемыми геодезическими пунктами. История развития GPS наблюдений в Италии описана в работе [Baldi et al., 2015].

Для наблюдения за поведением вулкана Этна создана специальная отсчетная геодезическая основа, покрывающая область вулканической постройки [Palano et al., 2010]. Развитие GPS сетей в регионе описано в работе [Bonforte et al., 2016]. Основным оператором GPS сетей является Национальный институт геофизики и вулканонологии Италии (Istituto Nazionale di Geofisica e Vulcanologia – INGV [<http://www.ingv.it/it/>]). Некоторые постоянно действующие станции функционируют под управлением компании Telespazio [<http://www.telespazio.com/>].

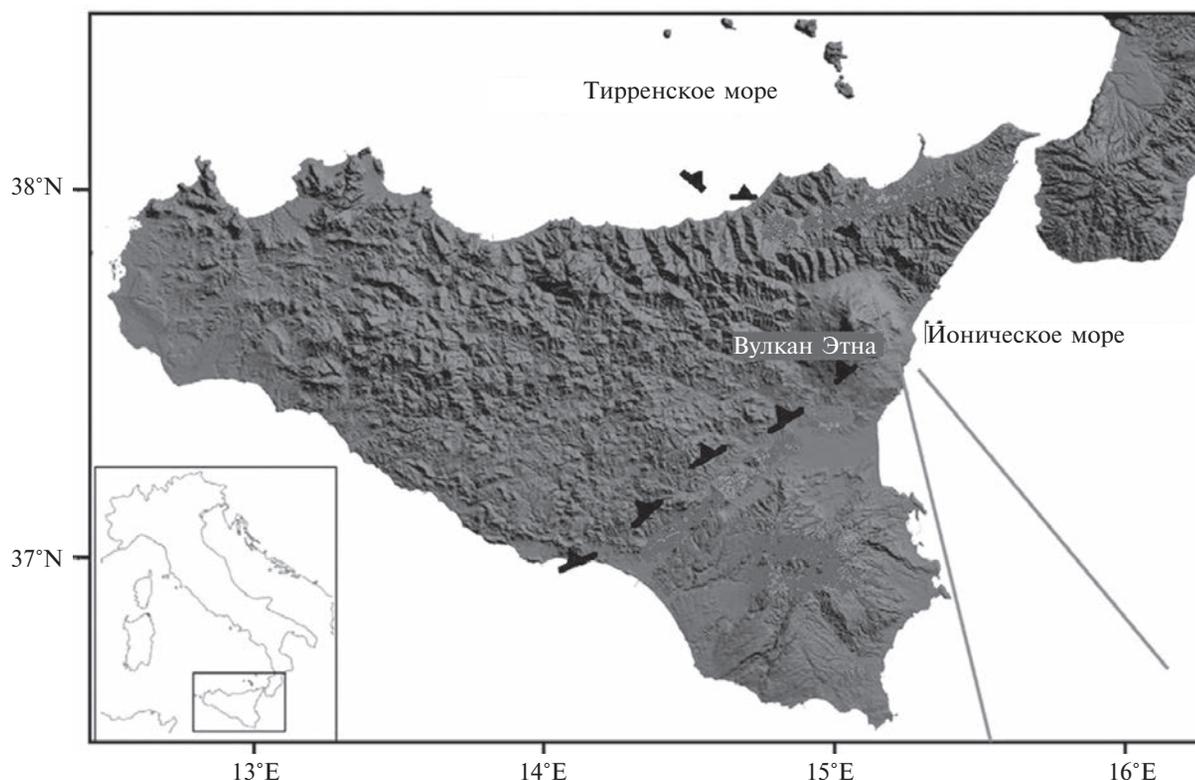


Рис. 1. Главные тектонические линейменты Сицилии и вулкана Этны. Прямые линии – главные системы разломов; пунктирные линии с треугольниками – главные региональные надвиги [D'Ajello Caracciolo et al., 2014].

Исследование района Этны входит в важнейший научный проект RING [INGV RING, 2016] по исследованию средствами GPS кинематики взаимодействия Африканской и Евразийской тектонических плит в Западном Средиземноморье, который начал реализовываться в 2004 г. по инициативе INGV [Avallone et al., 2010].

Данные непрерывных GPS наблюдений региона в совокупности с другими пунктами глобальной постоянно действующей сети используются в ряде геодинамических проектов, один из которых осуществляется в Геодезической лаборатории Невады Университета Невады, Рено, США [http://geodesy.unr.edu/]. Эта лаборатория обрабатывает и предоставляет для свободного использования временные ряды координат постоянно действующих GPS станций.

Для вычисления горизонтальных деформаций нами использованы временные ряды горизонтальных смещений, полученные Геодезической лабораторией Невады. Стратегия обработки первичных наблюдений представляла собой режим "point precise positioning" PPP, использующий точную GPS продукцию Jet Propulsion Laboratory. Обработке подвергались данные суточных наблюдений на пунктах GPS с использованием

пакета GIPSY OASIS II. Значения координат получены в глобальной системе отсчета IGS08 [http://geodesy.unr.edu/index.php].

ПРОЦЕДУРЫ ОБРАБОТКИ ДАННЫХ

Первым шагом обработки данных было устранение пропусков, имеющих место на некоторых станциях GPS. Заметим, что перерывы в наблюдениях не являются редкими событиями и связаны, как правило, с труднодоступностью мест расположения пунктов сети. Так, наибольшее число пропусков имеется на пункте BRO2, расположенном в непосредственной близости от вершины вулкана Этна. На этом пункте разрывы в наблюдениях достигают нескольких месяцев. Такие продолжительные потери данных, безусловно, сказываются на качестве последующего анализа. Они менее болезненны в случае эпизодических перерывов наблюдений на несколько суток. Но даже и в случае продолжительных перерывов мы, все же, имеем возможность отследить главные долговременные тенденции изучаемых изменений, применяя интерполяцию данных.

Для устранения разрывов была применена интерполяция Эрмитовыми сплайнами, с ис-

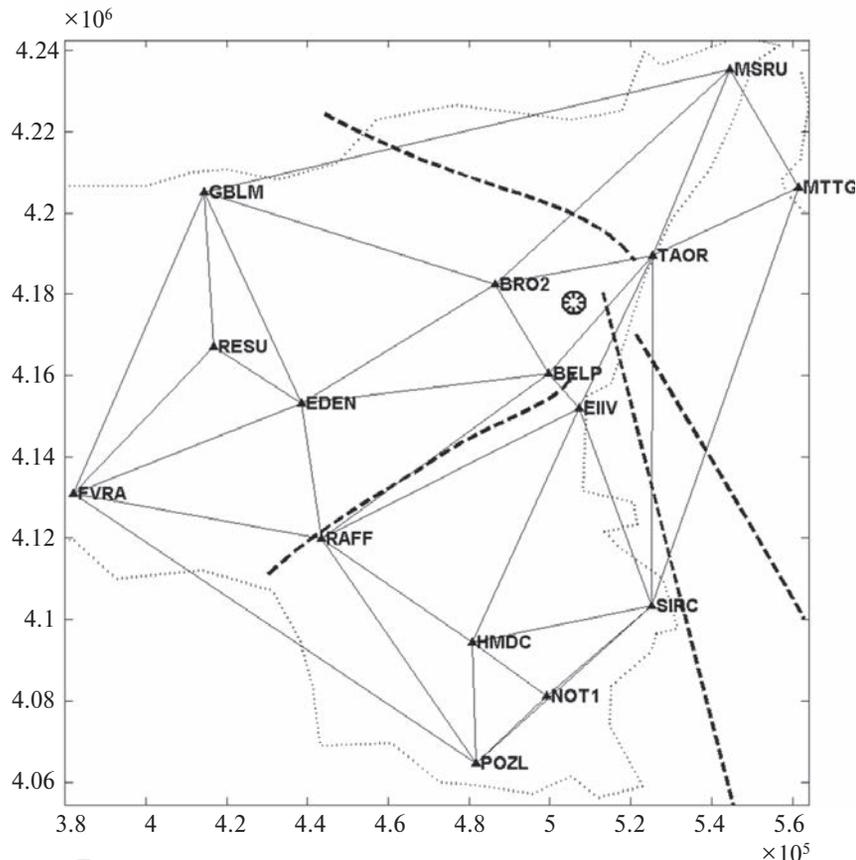


Рис. 2. Сеть триангуляции Делоне.

Береговая линия указана точечным пунктиром; жирные линии — главные разломы (см. рис. 1); окружность с внутренними штрихами — вершинный кратер вулкана Этна.

пользованием стандартной процедуры пакета Матлаб [<http://www.mathworks.com/>].

Процедура интерполяции была применена для всех без исключения временных рядов координат, что бы иметь возможность получения регулярных пространственно-временных характеристик деформирования исследуемой территории с суточным разрешением.

Горизонтальные деформации вычислялись для треугольников триангуляции Делоне, представленных на рис. 2. Для вычисления деформаций конечных элементов использован тензор горизонтальных деформаций

$$T_{\varepsilon} = \begin{pmatrix} \varepsilon_n & \varepsilon_{nb} \\ \varepsilon_{bn} & \varepsilon_b \end{pmatrix},$$

элементы которого равны, и

$$\varepsilon_{bn} = \varepsilon_{nb} = \frac{1}{2} \left(\frac{\partial u_n}{\partial e} + \frac{\partial u_b}{\partial n} \right), \text{ соответственно,}$$

$$\text{при этом } \frac{\partial u_n}{\partial e} + \frac{\partial u_b}{\partial n} = \gamma_{nb} = \gamma_{bn}.$$

С целью изучения пространственно-временного распределения горизонтальных деформаций были рассчитаны следующие инвариантные характеристики.

Максимальные растяжения/сжатия ε_1 и ε_2 .

$$\varepsilon_{1,2} = \frac{1}{2} \left[\varepsilon_n + \varepsilon_b \pm \sqrt{(\varepsilon_n + \varepsilon_b)^2 + \gamma_{ne}^2} \right]$$

Максимальный сдвиг $\gamma_{\max} = \varepsilon_1 - \varepsilon_2$.

Дилатация $\Delta = \varepsilon_1 + \varepsilon_2$.

Для получения однородного набора данных значения величины дилатации были нормированы к средней площади треугольника. Полученные значения масштабированной дилатации интерполировались на регулярную сетку с использованием эрмитовых сплайнов при помощи стандартной процедуры программного пакета Матлаб. Таким образом, были получены схемы горизонтального распределения деформаций дилатации на заданные интервалы времени.

С целью иллюстрации характера временных изменений из последовательных этапов деформации была составлена анимация, демонстрирующая изменение деформации во времени.

Аналогичная графическая визуализация была сделана также для вертикальных смещений земной поверхности, полученных непосредственно по временным рядам [<http://geodesy.unr.edu/index.php>].

Последовательность кадров с более редкой повторяемостью, чем в реальном расчете представлена на рисунках 3 и 4.

РЕЗУЛЬТАТЫ АНАЛИЗА ДВИЖЕНИЙ И ДЕФОРМАЦИЙ ЗЕМНОЙ ПОВЕРХНОСТИ

Рис. 3 и 4 демонстрируют изменения горизонтальных деформаций дилатации и вертикальных смещений на протяжении семи лет, включающих 3 эпизода извержений вулкана Этна. В моменты отсутствия экструзии условные обозначения вершинного кратера окрашены в белый цвет.

На протяжении всего интервала наблюдений центральная часть вулканической постройки ожидаемо демонстрирует развитие деформации растяжения и подъем. В зоне контакта (предположительной субдукции) микроплит вдоль разлома (надвига) Гела-Катания развиты деформации сжатия и опускания земной поверхности. Неожиданным является сильный максимум растяжений на восточной границе сети. Его существование требует объяснения.

Для выявления связи наблюдаемых изменений рассмотрим поведение горизонтальной деформации дилатации и вертикальных смещений в прикратерной зоне. Графики изменений этих характеристик с дискретностью одни сутки представлены на рис 5. В верхней его части показан временной ряд самых контрастных изменений среди всего набора данных. По его форме можно видеть, что применяемая интерполяция не вносит ложных длиннопериодных компонент и не превышает амплитуды общего шума процесса.

Сравнение, аналогичное представленному на рис. 5, выполнено в предположении связи растяжений акватории восточного побережья Сицилии и области вершины Этны. На рис. 6 приведены графики изменений указанных характеристик.

Выше нами исследован осредненный характер деформации, так как кратерная зона сильно неоднородна, и в разные моменты извержения происходили в разных местах из разных кратеров. Детальный анализ деформации невозможен из-за недостаточной плотности наблюдательной сети, и наш анализ выявляет лишь общие тенденции.

В предположении о генетической связи площадного растяжения и поднятий территории был выполнен кросскорреляционный анализ соответствующих временных рядов.

Вычислялась кросскорреляционная функция $r_{xy}(\tau)$ между каждой парой рядов x_t и y_t , сдвинутых друг от друга на τ интервалов времени

$$r_{xy}(\tau) = \frac{(n-\tau) \sum_{t=1}^{n-\tau} x_t y_{t+\tau} - \sum_{t=1}^{n-\tau} x_t \sum_{t=1}^{n-\tau} y_{t+\tau}}{\sqrt{\left[(n-\tau) \sum_{t=1}^{n-\tau} x_t^2 - \left(\sum_{t=1}^{n-\tau} x_t \right)^2 \right] \left[(n-\tau) \sum_{t=1}^{n-\tau} y_t^2 - \left(\sum_{t=1}^{n-\tau} y_t \right)^2 \right]}}$$

Положение экстремумов функции (1) на временной оси фиксирует значения временных задержек одного физического процесса по отношению к другому. Величины коэффициентов (1) демонстрируют статистическую значимость взаимосвязи этих процессов. Результаты кросскорреляционного анализа представлены в таблице.

Видно, что сдвиг по времени (особенно при сравнении дилатации акватории и вершинной области) несколько улучшает коррелированность данных. Рисунки 3, 4 и 5 также свидетельствуют в пользу запаздывания значимых поднятий вершинной области по отношению к горизонтальным деформациям растяжения.

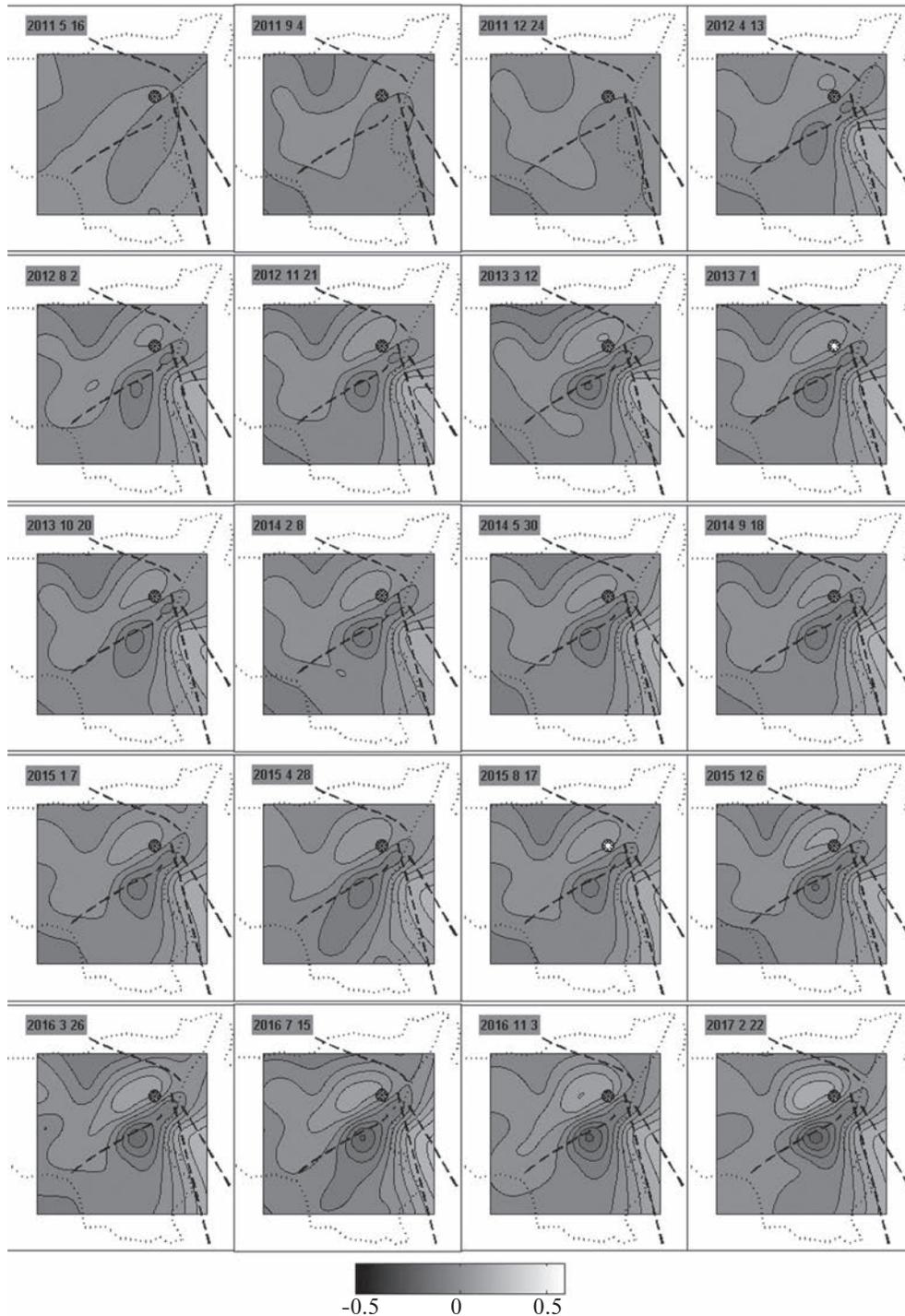


Рис. 3. Ход пространственно-временных изменений дилатации на протяжении интервала исследований. Сечение изолиний дилатации равно $0.05 \cdot 10^{-5}$. Остальные обозначения см. рис. 1 и 2.

Оценка временных сдвигов и степени статистической связи

Независимая переменная	Зависимая переменная	$r \pm \sigma_r$	Сдвиг (дней)	$r \pm \sigma_r$
Дилатация вершины	Вертикальные смещения вершины	0.65 ± 0.01	130	0.68 ± 0.01
Дилатация акватории	Дилатация вершины	0.605 ± 0.014	2	0.607 ± 0.014

В целом корреляционный анализ демонстрирует наличие довольно высокой корреляции между сопоставляемыми характеристиками. Корреляция вертикальных смещений и деформаций привершинной территории максимальна при взаимном смещении временных рядов на 130 су-

ток. Это можно трактовать в пользу осторожного предположения о первичности горизонтальных деформаций Этны по отношению к вертикальным в процессе извержений. Как полагают авторы работы [Chiocci et al., 2011], преобладание здесь тектонического режима растяжения способству-

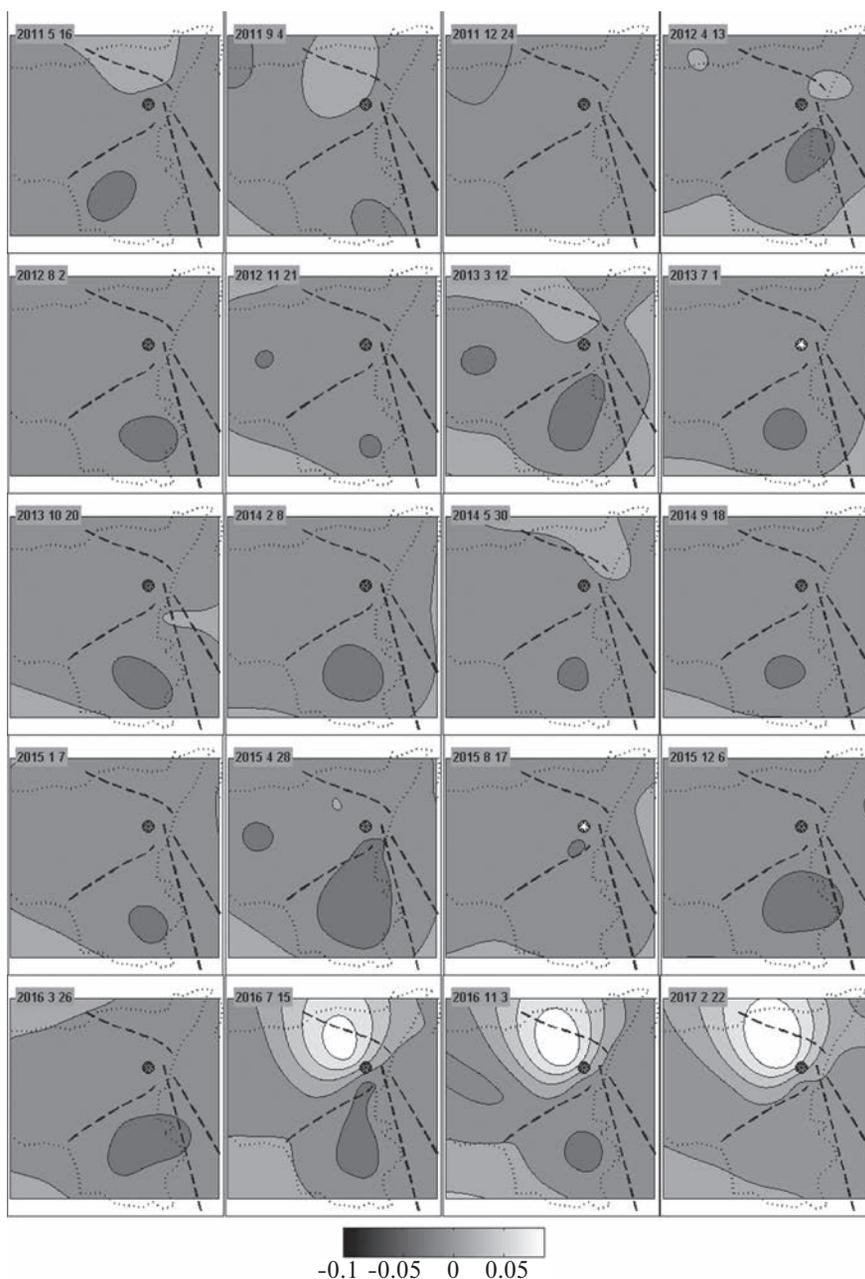


Рис. 4. Ход пространственно-временных изменений вертикальных смещений на протяжении интервала исследования. Сечение изолиний вертикальных смещений равно 0.025 м. Остальные обозначения см. рис. 3.

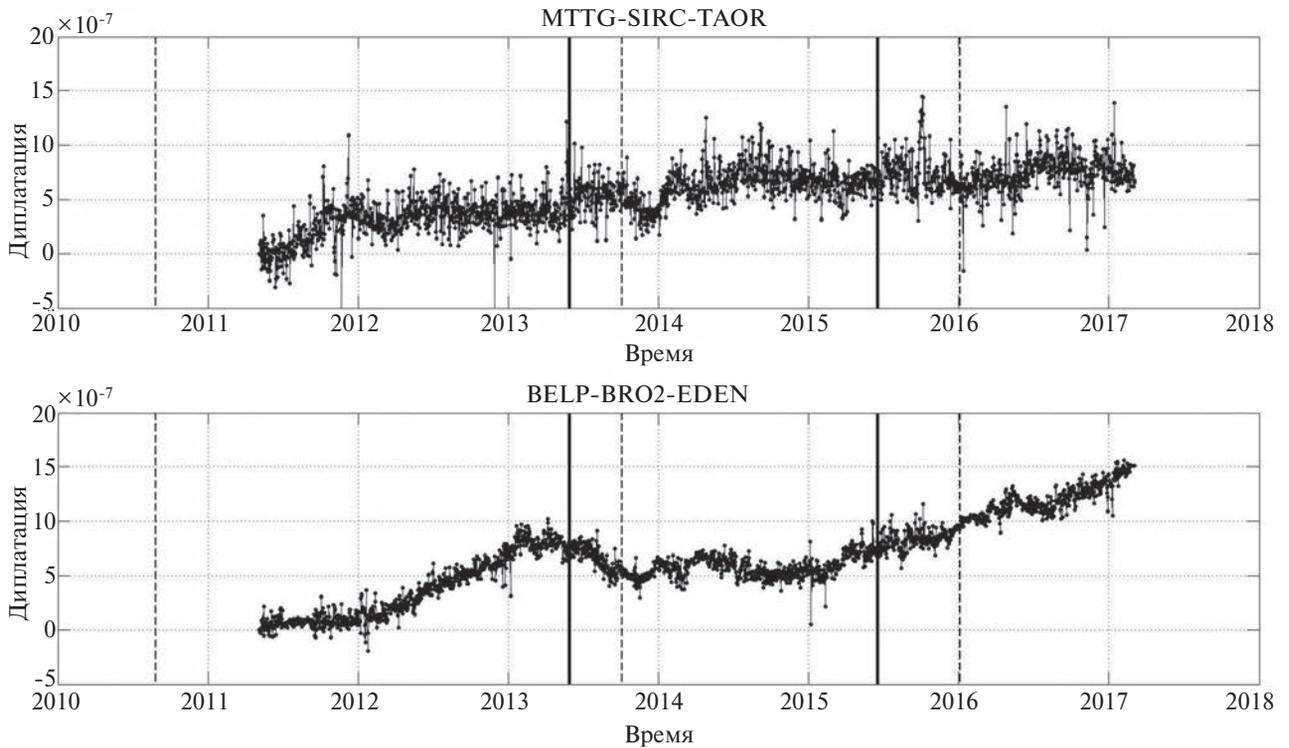


Рис. 5. Дилатация земной поверхности (внизу) в окрестности вершины вулкана Этна. Вертикальные пунктирные линии отмечают начало, а вертикальные сплошные линии – завершение экструзивных извержений. Гладкие отрезки кривой отвечают пропускам наблюдений, заполненным интерполяцией.

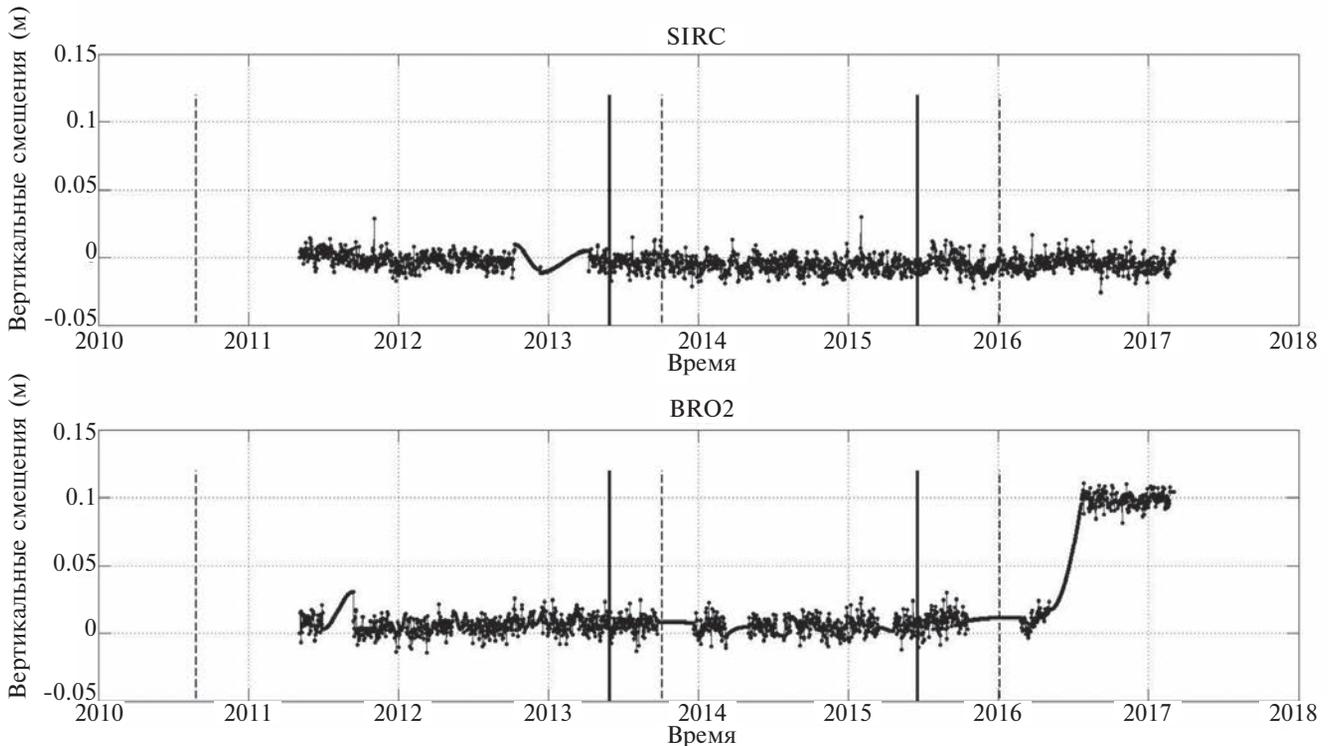


Рис. 6. Изменения вертикальных смещений прибрежной территории (вверху) и вершинной части вулкана. Обозначения см. рис. 5.

ет подъему первичной магмы без ее длительного хранения в верхней коре, что характерно при режиме регионального сжатия. Статистическая зависимость деформаций растяжения прибрежной акватории и территории вершины также достаточно сильная. Она несколько усиливается при смещении рядов на 2 суток друг относительно друга, но этот результат может иметь и случайный характер. Поэтому нет оснований говорить о временном запаздывании одного процесса по отношению к другому. Тем не менее, высокая положительная корреляция свидетельствует о высокой вероятности генетической связи этих двух очагов горизонтальных растяжений земной поверхности, протекающих практически синхронно.

ТЕКТОНИЧЕСКАЯ ИНТЕРПРЕТАЦИЯ ПРОЦЕССА ДЕФОРМИРОВАНИЯ

Выявленные выше тенденции, пространственно-временного распределения горизонтальных деформаций и вертикальных смещений могут быть проинтерпретированы в связи с тектоническими и геодинамическими особенностями региона. Растяжения в районе вершинных кратеров свидетельствуют о наличии здесь вполне ожидаемого центрального источника деформаций. Протяженная область сжатий и слабых опусканий к югу от вулкана отвечает зоне разлома Гела-Катанья и может быть объяснена сближением бортов этого надвига (иногда трактуемого как выход на поверхность слабовыраженной зоны субдукции).

Неожиданным представляется экстремум горизонтальных растяжений, расположенный в восточной части наблюдательной сети, в прибрежной части акватории Ионического моря. При этом вертикальные смещения в этом районе практически нулевые. Эти деформации отчасти согласуются с процессом отдаления о-ва Сицилия от Побережья Калабрии Аппенинского полуострова, что показано, например, в работах [D'Agostino, Selvaggi, 2004; Palano et al., 2012; Ventura et al., 2014; Doglioni et al., 2012].

Максимум растяжений располагается несколько севернее города Катаньи, восточнее станции EIV (см. рис. 2), в акватории Ионического моря. Эта территория является местом сочленения сразу нескольких важнейших разломных зон (см. рис. 1). Здесь также расположена оконечность Мальтийского эскарпа, резко выраженого в батиметрии дна Ионического моря [Argnani, Bonazzi, 2005]. Эти совпадения указывают на неслучайность этой деформационной аномалии.

С целью возможных объяснений этого феномена используем дополнительные геофизические данные.

Прежде всего отметим, что указанной области отвечает несильный, но достаточно явственный подъем границы Мохо (см. рис. 7, 8 из работы [Nicolich et al., 2000]).

Наиболее интересные данные получены в результате геомагнитной съемки района Этны [D'Ajello Caracciolo et al., 2014]. Вблизи расположения локального максимума горизонтального растяжения земной поверхности зарегистрирован высокий уровень магнитного поля — более 200 нТ. При этом область этой положительной магнитной аномалии распространяется в направлении СЗ-ЮВ от вершины вулкана до прибрежной части Ионического моря, в область регистрации максимальных растяжений по данным GPS. Характер и непрерывность поля магнитных аномалий свидетельствуют о подводном продолжении общей структуры вулканической постройки в восточном направлении.

Здесь же, в нескольких километрах к северу от г. Катанья, развита система разломов Тимпе, представляющая собой наиболее примечательную структурную особенность вулкана [Azzago et al., 2012]. Она заполняет большую часть восточного фланга вулканической постройки вытянутым поясом разломов, имеющих продолжение на морском шельфе, с растягивающим характером смещений.

Морские исследования данного района позволили выдвинуть гипотезу об активно протекающем здесь тектоническом процессе [Chiocci et al., 2011]. Авторы связывают тектоническую активность в большей мере с магматическим процессом, а не с орогенной тектоникой формирования Апеннинской цепи. Наблюдаемые здесь положительные формы рельефа не содержат структур сжатия. Наоборот, «горб» пронизан структурами растяжения, представляющими хрупкую реакцию на крупномасштабную и продолжительную гравитационную неустойчивость, деформирующую континентальную окраину. Предложенная модель предполагает, что в последние сотни тысяч лет здесь развивается тектоника растяжения. Т.е. непрерывная декомпрессия на вершине вулкана способствует подъему первичной магмы без длительного хранения в верхней коре, как это можно было ожидать при режиме сжатия. Именно развитие растягивающих напряжений и деформаций расценивается авторами [Chiocci et al., 2011] как основная причина исторического роста активного базальтового вулкана на вершине активного пояса разломов — Апеннинской дуги в Сицилии

Полученные нами результаты изучения кинематики деформаций по данным GPS подкрепляют эту гипотезу.

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

В результате определения движений и деформаций земной поверхности на протяжении около 7 лет с временным разрешением 1 сутки по данным GPS наблюдений получены результаты, способствующие развитию представлений о современном тектоническом режиме района вулкана Этны и специфике его вулканического процесса.

Установлены тенденции пространственно-временного распределения вертикальных смещений и горизонтальной дилатации большей части территории о-ва Сицилия, части Калабрии и непосредственно района расположения вулкана.

Наибольший интерес представляют сильные экстремумы горизонтальных растяжений, выявляемые в центральной части вулканической постройки и на шельфе восточного побережья Сицилии. Растяжения в кратерной области вулкана коррелируют с развитием здесь же восходящих движений, которому как бы предшествуют деформации растяжения, что может рассматриваться в качестве указания на их первичность.

Корреляция выявляется также между растяжениями в кратерной области вулкана и на восточном шельфе Сицилии. Растяжения в шельфовой зоне акватории Ионического моря не противостоят современным представлениям о характере тектоники этого района, подтверждая наличие в этом месте активного источника деформации, статистически и, видимо, генетически связанного с растяжениями в центральной части вулкана. Взаимосвязь зон тектонических растяжений в кратерной области Этны и на акватории весьма подкрепляется характером геомагнитного поля. Сильная морфологически единая протяженная аномалия протягивается от кратерной зоны вулкана на акваторию [D'Ajello Caracciolo et al., 2014]. Такая аномалия может порождаться питающей вулкан магматической системой. Сама эта система может быть следствием развития области повышенной проницаемости литосферы, связанной с существованием здесь мощной системы разломов (см. рис. 1) и режимом растяжения, выявленным по данным GPS наблюдений. Отметим, что в этом плане (кроме состава вулкаников) вулканизм Этны оказывается похож на вулканизм многих морских подводных вулканов, последние также связаны не с астеносферными плюмами, а с областями повышенной проницаемости литосферы [Мирлин и др., 2018].

Полученные результаты дают основание подчеркнуть перспективность исследований деформаций земной поверхности с использованием GPS наблюдений на территориях проявления активного вулканизма в более широких пространственно-временных масштабах, чем в непосредственной близости от областей и эпизодов развития магматических экструзий.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

- Апродов В.А.* Вулканы. М.: Мысль, 1982. 367 с.
- Большое трещинное Толбачинское извержение, Камчатка 1975–1976 гг. / Под ред. С.А. Федотова. М.: Наука, 1984. 637 с.
- Кафтан В.И.* Анализ тригонометрического нивелирования в районе вулкана Толбачик // Геодезия и картография. 1991. № 1. С. 32–36.
- Магуськин М.А., Левин В.Е.* Геодезический мониторинг деформаций земной коры в Карымском вулканическом центре // Проблемы эксплозивного вулканизма (к 50-летию катастрофического извержения вулкана Безымянный). Петропавловск-Камчатский, 2006. С. 157–165.
- Магуськин М.А., Шароглазова Г.А.* Деформации земной поверхности Карымского вулканического центра // Вулканология и сейсмология. 1992. № 4. С. 90–110.
- Мирлин Е.Г., Миронов Ю.В., Родкин М.В., Чесалова Е.И.* Внутриплитные подводные горы северо-западного сектора Тихого океана // Океанология. 2018. Т. 58. № 2. С. 1–9.
- Муравьев Я.Д., Федотов С.А., Будников В.А. и др.* Вулканическая деятельность в Карымском центре в 1996 г.: вершинное извержение Карымского вулкана и фреатомагматическое извержение в кальдере Академии Наук // Вулканология и сейсмология. 1997. № 5. С. 38–71.
- Энман С.В.* Приповерхностные напряжения и деформации в районе Большого Толбачинского трещинного извержения 1975–1976 гг. на Камчатке // Комплексные геодинамические полигоны. М., 1984. С. 123–127.
- Argnani A., Bonazzi C.* Malta Escarpement fault zone offshore eastern Sicily: Pliocene–Quaternary tectonic evolution based on new multichannel seismic data // Tectonics. 2005. V. 24. <http://dx.doi.org/10.1029/2004TC001656> (TC4009).
- Avallone A., Selvaggi G., D'Anastasio E.* The RING network: improvements to a GPS velocity field in the central Mediterranean, *Annals of Geophysics* 2010. V. 53. № 2. P. 39–54. DOI: 10.4401/ag-4549
- Azzaro R., Branca S., Gwinner K., Coltelli M.* The volcano-tectonic map of Etna volcano, 1:100000 scale: an integrated approach based on a morphotectonic analysis from high-resolution DEM constrained by geologic, active faulting and seismotectonic data // *Ital. J. Geosci. (Boll. Soc. Geol. It.)*, 2012. V. 131. № 1. P. 153–170. DOI: 10.3301/IJG.2011.29
- Baldi P., Devoti R., Riguzzi F., Pietrantonio G.* Satellite positioning and geophysics studies in Italy // *Rendiconti Lincei. Scienze Fisiche e Naturali*. 2015. DOI: 10.1007/s12210-015-0385-6
- Bianca M., Monaco C., Tortorici L., Cernobori L.* Quaternary normal faulting in southeastern Sicily (Italy): a seismic source for the 1693 large earthquake // *Geophys. J. Int.* 1999. V. 139. P. 70–394.
- Bonforte A., Fagone S., Giardina C. et al.* Global positioning system survey data for active seismic and volcanic areas of eastern Sicily, 1994 to 2013. *Scientific data*, 3:160062 / 2016. DOI: 10.1038/sdata.2016.62 <https://www.nature.com/articles/sdata201662>
- Bousquet J.C., Lanzafame G.* The tectonics and geodynamics of the Mt. Etna: synthesis and interpretation

of geological and geophysical data / Eds A. Bonaccorso et al. // Geophysical Monograph Series, AGU, 143. Mt. Etna: Volcano Laboratory, 2004. P. 29–47.

Casula G., Bianchi M.G. Comparison of the historic seismicity and strain-rate pattern from a dense GPS-GNSS network solution in the Italian Peninsula // *Geodesy and Geodynamics*. 2016. V. 7. № 5. P. 303–316.

Chiocci F.L., Coltelli M., Bosman A., Cavallaro D. Continental margin large-scale instability controlling the flank sliding of Etna volcano // *Earth and Planet. Science Lett.* 2011. V. 305. P. 57–64. doi: 10.1016/j.epsl.2011.02.040

D'Agostino N., Selvaggi G. Crustal motion along the Eurasia-Nubia plate boundary in the Calabrian Arc and Sicily and active extension in the Messina Straits from GPS measurements // *Journal of Geophys. Res.* 2004. V. 109. B11402. doi: 10.1029/2004JB002998

D'Ajello Caracciolo F., Nicolosi I., Carluccio R et al. High resolution aeromagnetic anomaly map of Mount Etna volcano, Southern Italy // *Journal of Volcanology and Geothermal Res.* 2014. V. 277. P. 36–40. http://dx.doi.org/10.1016/j.jvolgeores.2014.03.008

Doglioni C., Innocenti F., Mariotti G. Why Mt Etna? // *Terra Nova*. 2001. V. 13. Issue 1. P. 2–31.

Doglioni C., Ligi M., Scrocca D. et al. The tectonic puzzle of the Messina area (Southern Italy): Insights from new seismic reflection data // *SCIENTIFIC REPORTS*. 2012. V. 2. P. 970. DOI: 10.1038/srep00970

Gvirtzman Z., Nur A. The formation of Mount Etna as the consequence of slab rollback // *Nature*. 1999. V. 401. P. 782–785.

INGRING WORKING GROUP//RETE INTEGRATA NAZIONALE GPS/ 2016. DOI: 10.13127/RING

Nicolich R., Laigle M., Hirn A. Crustal structure of the Ionian margin of Sicily: Etna volcano in the frame of regional evolution // *Tectonophysics*. 2000. V. 329. P. 121–139.

Palano M., Ferranti L., Monaco C. GPS velocity and strain fields in Sicily and southern Calabria, Italy: Updated geodetic constraints on tectonic block interaction in the central Mediterranean // *Journal of Geophys. Res.* 2012. V. 117. B07401. doi: 10.1029/2012JB009254,

Palano M., Rossi M., Cannavo F. Etn@ref: a geodetic reference frame for Mt. Etna GPS networks // *Annals of Geophysics*. 2010. V. 53. № 4. P. 49–57. doi: 10.4401/ag-4879

Puglisi G., Bonforte A. Dynamics of Mount Etna Volcano inferred from static and kinematic GPS measurements // *J. Geophys. Res.* 2004. V. 109. B11404. doi: 10.1029/2003JB002878.

Ventura B. M., Serpelloni E., Argnani A. Fast geodetic strain-rates in eastern Sicily (southern Italy): New insights into block tectonics and seismic potential in the area of the great 1693 earthquake // *Earth and Planet. Sci. Lett.* 2014. V. 404. P. 77–88. http://dx.doi.org/10.1016/j.epsl.2014.07.025

EARTH'S SURFACE DEFORMATION ON MOUNT ETNA: GPS MEASUREMENTS, INTERPRETATION, RELATIONSHIP TO THE MODE OF VOLCANISM

V. I. Kaftan^{1, 2, 3, *} and M. V. Rodkin^{4, 5, **}

¹*Geophysical Center, Russian Academy of Sciences, ul. Molodezhnaya, 3, Moscow, 119269 Russia*

²*Institute of Agrarian Technology, Russia's University of Peoples' Friendship, ul. Miklukho-Maklaya, 6, Moscow, 117198 Russia*

³*Federal Science Center of Geodesy, Cartography, and 3D Data Infrastructure, ul. Onezhskaya, 26, Moscow, 125413 Russia*

⁴*Institute of Earthquake Prediction Theory and Mathematical Geophysics, Russian Academy of Sciences, ul. Profsoyuznaya, 84/32, Moscow, 117997 Russia*

⁵*Institute of Marine Geology and Geophysics, Far East Branch, Russian Academy of Sciences, ul. Nauki, 1B, Yuzhno-Sakhalinsk, 693022 Russia*

*e-mail: v.kaftan@gcras.ru

**e-mail: rodkin@mitp.ru

Received January 15, 2018

We present results from a study of lateral Earth's surface deformation and vertical movements in the area of the Mount Etna active volcano (Sicily, Italy) based on observations by global satellite navigation systems in 2011–2017 at time intervals of 24 hours at sparse stations of the regional geodetic network. The study of Mount Etna is especially important because (1) the volcano stands in a densely populated area, (2) the eruptions are nearly continuous, and (3) the location of the volcano is inconsistent with plate tectonic concepts. Subregional trends have been identified in the deformation of the area of study. Extension was recorded, not only around the summit crater, but also far from it, in the Ionian Sea. This circumstance suggests the existence of an extensive plumbing system at depth whose sources are far from the active summit crater. We discuss geological and geophysical survey results of the coastal area and the sea area in the region. It is shown that Earth's surface deformation should be studied from observations of the existing networks that are sparse, but cover a large area.

Key words: Earth's surface deformation, vertical movements, GPS, Etna volcano, tectonics.