

# ИССЛЕДОВАНИЕ ДВИЖЕНИЙ И ДЕФОРМАЦИЙ ЗЕМНОЙ КОРЫ ВОСТОЧНОЙ ТУРЦИИ В СВЯЗИ С ЗЕМЛЕТРЯСЕНИЕМ ВАН (23.10.2011 Г., $M_w = 7.2$ ) С ИСПОЛЬЗОВАНИЕМ ДАННЫХ GPS-НАБЛЮДЕНИЙ<sup>1</sup>

© 2021 г. В. И. Кафтан<sup>1, \*</sup>, И. Кафтан<sup>2, \*\*</sup>, Е. Гёк<sup>2, \*\*\*</sup>

<sup>1</sup>Геофизический центр РАН, Москва, Россия

<sup>2</sup>Университет “9 сентября”, Измир, Турция

\*E-mail: kaftan@geod.ru

\*\*E-mail: ilknur.kaftan@deu.edu.tr

\*\*\*E-mail: elcin.gok@deu.edu.tr

Поступила в редакцию 10.12.2019 г.

После доработки 02.10.2020 г.

Принята к публикации 03.11.2020 г.

Разрушительное землетрясение магнитудой  $M_w = 7.2$  произошло в регионе Ван, Восточной Турции, 23.10.2011 г. В настоящем исследовании анализируются характеристики деформации земной поверхности до, во время и после этого землетрясения. Данные постоянной сети GPS площадью  $300 \times 300$  км<sup>2</sup> использованы для количественной оценки деформации земной поверхности в области эпицентральной зоны землетрясения в интервале с 16.01.2009 г. по 29.10.2012 г. с суточным временным разрешением. Величины дилатации, полного сдвига, горизонтальные и вертикальные смещения были определены примерно за три года до и один год после землетрясения Ван 2011 г. Для наблюдения за изменениями деформационного процесса до и после землетрясения поля пространственного распределения деформаций на каждые сутки объединены в видеофильм. Аномальные деформации были выявлены за несколько месяцев до землетрясения на расстоянии порядка 100 км от будущего эпицентра. Эволюция движений и деформаций в исследуемой области демонстрирует вероятную связь между развитием аномальных деформаций в разломной зоне Варто и структурной зоне Битлис–Загрос с процессом подготовки землетрясения Ван. Это позволяет предполагать, что подготовительные деформационные процессы могут происходить на удалении от будущего сейсмического очага на десятки и сотни километров.

*Ключевые слова:* Землетрясение Ван (23.10.2011,  $M_w = 7.2$ ), Восточная Турция, деформации земной поверхности, данные GPS.

**DOI:** 10.31857/S0002333721030078

## ВВЕДЕНИЕ

Одним из наиболее эффективных современных методов исследования механизмов землетрясений является анализ движений и деформаций земной поверхности. Особенно интересным в этом отношении является обнаружение деформационных сигналов перед сильными сейсмическими событиями. Эта задача сегодня решается с помощью непрерывного мониторинга деформации земной поверхности с помощью глобальных навигационных спутниковых систем (ГНСС). Такие наблюдения используются уже в течение

30 лет, что позволяет изучать отдельные пресеismicкие процессы, которые происходили в период ГНСС наблюдений в различных регионах Земли. Глобальная сеть непрерывного мониторинга ГНСС с ежедневной частотой записи содержит несколько тысяч станций и постоянно расширяется. Во многих сейсмически активных регионах мира развернуты хорошо функционирующие и достаточно плотные сети наблюдений ГНСС. Накопленные сегодня данные о перемещениях и деформациях земной коры в этих сейсмически активных регионах определяют наши возможности в изучении предполагаемых деформационных предвестников землетрясений. Деформационные предвестники землетрясений ра-

<sup>1</sup> Дополнительные материалы для этой статьи доступны по doi 10.31857/S0002333721030078 для авторизованных пользователей.

нее уже были зафиксированы на значительных расстояниях от эпицентров сильных землетрясений [Kaftan, Ostach, 1996; Mescherikov, 1968].

Движения и деформации земной поверхности в сейсмоактивных регионах Турции детально исследуются на протяжении длительного времени. Временные ряды смещений земной коры и скоростей изменения главных деформаций были проанализированы в работе [Tiryakioglu et al., 2017]. Кроме того, пре-, ко- и постсейсмические движения были детально исследованы в работе [Altiner et al., 2012]. Модели ко- и постсейсмических деформационных процессов для землетрясения Ван были получены авторами [Wang et al., 2015] с использованием комбинаций разных наборов данных, таких как радарная интерферометрия с синтезированной апертурой, мультиапертурная интерферометрия, трассирование офсетов и GPS-измерения.

Настоящее исследование посвящено анализу движений и деформаций земной поверхности в восточной части Турции в области сильного землетрясения Ван (23.10.2011 г.,  $M_w = 7.2$ ) с использованием GPS-наблюдений, выполненных в период с 16.01.2009 г. по 29.10.2012 г. Нашей задачей является идентификация деформационных предвестников землетрясения Ван по GPS-измерениям с суточным временным разрешением и широким покрытием исследуемой территории. В работе также исследуются постсейсмические деформации. Анализ пространственно-временных особенностей деформации земной поверхности в связи с землетрясением Ван и региональным сейсмическим режимом выполнен нами с использованием данных о разломной тектонике региона.

## ТЕКТОНИЧЕСКАЯ ОБСТАНОВКА И РЕГИОНАЛЬНАЯ СЕЙСМИЧНОСТЬ

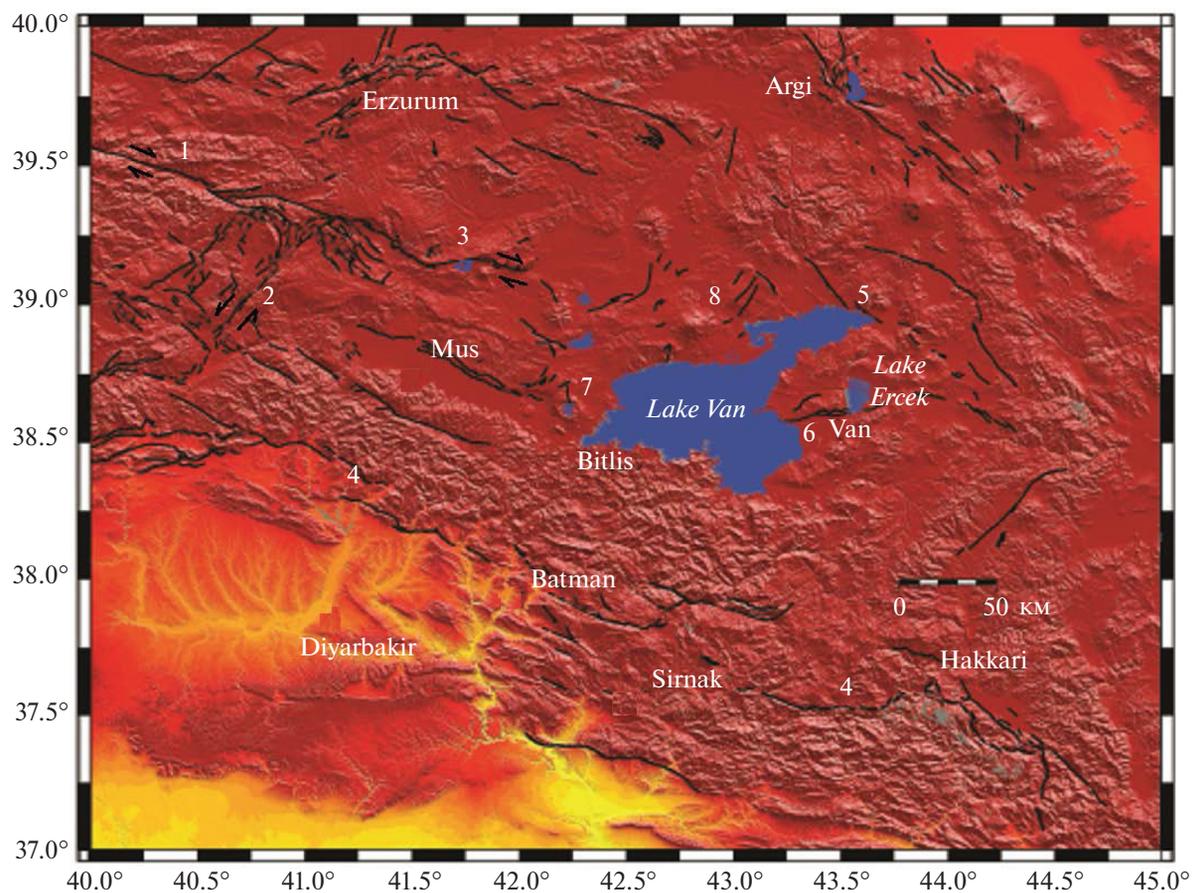
Восточная Анатолия характеризуется активной сейсмичностью и вулканизмом [Toker et al., 2017], обусловленными конвергенцией Аравийской и Евразийской плит [Bozkurt, 2001; Koçyiğit et al., 2001; Koçyiğit, 2013]. При этом тектоника региона характеризуется разломами со сдвиговым механизмом смещений в районе шовной зоны Битлис и надвигами в зоне складчатого надвигового пояса Загрос [Koçyiğit et al., 2012]. Основными тектоническими структурами региона являются: разломная зона Эрджиш, имеющая простирание с северо-запада на юго-восток и правосторонний сдвиговый механизм смещения; зона разлома Ван восточного простирания с надвиговым механизмом; структуры растяжения, связанные с вулканической деятельностью

[Doğan, Karakaş, 2013; Emre et al., 2012; Özkaymak et al., 2011]. Согласно работе [Emre et al., 2011], используя поверхностные деформации, вызванные землетрясением Ван, и геоморфологические наблюдения, зона разлома Ван (VFZ) картирована как 30-километровая вытянутая зона с началом у побережья оз. Ван, примерно в 10 км к севернее г. Ван, и окончанием у южного побережья оз. Эрчек. В регионе существует множество вулканов, и некоторые из них, такие как Немрут и Сюфан, являются активными [Toker et al., 2017].

Землетрясение Ван произошло 23.10.2011 г. в 10:41 UTC примерно в 20 км к северу от Ван, западнее оз. Ерчек в Восточной Анатолии. Моментная магнитуда и глубина землетрясения были 7.2 и 19.1 км соответственно [AFAD..., 2011]. Фокальный механизм этого землетрясения демонстрирует всбросовый характер разрыва, что не противоречит тектонической обстановке региона. В первую неделю землетрясения Ван количество толчков с магнитудами более 4.0 в регионе составило 121, из них 7 с магнитудами более 5. В течение месяца после события ежедневно в регионе происходило в среднем 180 афтершоков, их общее число достигло 6284 события. Совокупность афтершоков формирует рассеянный кластер, ориентированный примерно ВСВ–ЗЮЗ между оз. Ван и районом Мурадие к северу от г. Ван [Emre et al., 2011]. Афтершоковая активность землетрясения продолжалась интенсивно, и 09.11.2011 г. в 21:23 по местному времени произошло землетрясение с локальной магнитудой 5.6 ( $M_w = 5.7$ ) к югу от оз. Ван в районе Эдремит. Это землетрясение имело иной механизм очага, чем землетрясение 23.10.2011 г., и оно сильно ощущалось в центре провинции. По мнению некоторых исследователей, это землетрясение стало крупнейшим подземным толчком после основного сейсмического события. Согласно [Tiryakioglu et al., 2017], землетрясение было вызвано левосторонним сдвигом на разломе Эрдемит, имеющем простирание СВ–ЮЗ. Принимая во внимание различные характеристики этих событий, мы полагаем, что неправильно объединять все афтершоки в единую однородную последовательность.

Географическое расположение исследуемого района и тектонические элементы показаны на рис. 1.

Показано в работе [Emre et al., 2011], что землетрясения в регионе были мелкофокусными и рассеянными. При этом GPS-наблюдения [Mackenzie et al., 2016] свидетельствуют о том, что сейсмичность протекает в условиях укорочения литосферы в направлении с севера на юг. Толщина коры, полученная из исследований методом



**Рис. 1.** Географическое расположение, рельеф и тектонические элементы исследуемого района: 1 – Северо-Анатолийский разлом; 2 – Восточно-Анатолийский разлом; 3 – разломная зона Варто; 4 – структурная зона Битлис–Загрос; 5 – разломная зона Эрджиш; 6 – разломная зона Ван; 7 – вулкан Немрут; 8 – Вулкан Сюпхан.

передаточных функций, составляет около 38 км в южной части структурной зоны Битлис и 50 км на севере под плато Эрзурум-Карс [Şengör et al., 2003; Zor et al., 2003]. Согласно работе [Keskin, 2003], кора располагается на очень тонком мантийном слое литосферы или даже непосредственно на астеносфере.

### СЕТЬ GPS-НАБЛЮДЕНИЙ И ПЕРВИЧНЫЕ ДАННЫЕ

Настоящее исследование использует данные ГНСС наблюдений непрерывно действующих опорных станций Турции (CORS-TR). CORS-TR является национальной сетью ГНСС Турции, организованной Университетом культуры Стамбула в кооперации с Национальным картографическим агентством, Главным управлением земельной регистрации и кадастра, при финансовой поддержке Совета Турции по научно-техническим исследованиям (TUBITAK). Подробное описание сети и ее возможностей использования доступно на

сайте <http://cors-tr.iku.edu.tr/ENGLISH.html>. Примеры эффективного использования национальной сети ГНСС в исследованиях сейсмической опасности описаны в работе [Ozener et al., 2009].

Для изучения ко- и постсейсмических деформаций в эпицентральной зоне землетрясения Ван был отобран восточный фрагмент Турецкой национальной сети, состоящий из 22 пунктов (рис. 1). С севера и востока фрагмент сети ограничен государственной границей Турции. Западная граница фрагмента включает в исследуемый район зону сочленения Северо-Анатолийского и Восточно-Анатолийского разломов. Чтобы улучшить конфигурацию треугольников на южной границе сети, в исследовании была задействована постоянная GPS-станция ISER, функционирующая под управлением Министерства водных ресурсов Ирака в рамках Иракской геопространственной системы отсчета (рис. 1). Таким образом, на основе использования непрерывных ГНСС наблюдений была предпринята попытка установить связь между сильным сейсмическим событием и

подвижностью основных региональных тектонических структур.

Конфигурация конечных элементов для анализа деформаций была определена с использованием триангуляции Делоне [Делоне, 1934]. Этот подход считается оптимальным, поскольку форма треугольника существенно влияет на точность определения деформации [Wu et al., 2003]. Триангуляция Делоне максимизирует минимальный угол среди всех углов всех треугольников, избегая таким образом “тонких” треугольников. В предыдущих исследованиях [Докукин и др., 2010] внимание было уделено изменению площади треугольников контрольной геодезической сети. Было показано, что для одинаковых векторов смещений рассчитанные значения деформаций изменяются обратно пропорционально площади треугольника. Для получения однородного набора деформаций в условиях неоднородной конфигурации геодезической сети предложено масштабирование их значений по отношению к средней площади ее треугольников.

Данные непрерывных ГНСС измерений в “статическом” режиме с суточным временным разрешением на период с 16.01.2009 до 29.10.2012 г. были использованы для определения деформаций земной поверхности.

Первичная обработка GPS-измерений была осуществлена Геодезической лабораторией Невады (Рено, США). Временные ряды координат пунктов представлены на сайте <http://geodesy.unr.edu/NGL-StationPages/GlobalStationList>. Стратегией определения координат являлся метод PPP, реализованный с использованием точных орбит и поправок часов спутников GPS, предоставленных Лабораторией реактивного движения НАСА. Среднесуточные значения координат были рассчитаны с использованием программного обеспечения GIPSY OASIS II. Значения координат были получены в глобальной системе координат IGS08. Повторяемость или “внутренняя” точность полученных координат оценивалась значениями  $\sigma < 5$  мм [Blewitt et al., 2018], поэтому значения стандартных ошибок деформации с длинами сторон треугольников более 50 км были менее  $10^{-7}$ .

## ОПРЕДЕЛЕНИЕ СМЕЩЕНИЙ И ДЕФОРМАЦИЙ ЗЕМНОЙ ПОВЕРХНОСТИ

По разным причинам временные ряды координат станции GPS имеют разрывы в наблюдениях, что исключает совместную обработку данных для определения деформаций в треугольниках сети наблюдений. Чтобы устранить этот недостаток, координаты для отсутствующих дат были получе-

ны путем интерполяции с помощью сплайнов Эрмита с использованием стандартной процедуры программного обеспечения Matlab. Интервалы пропусков данных, как правило, не превышают 4% от общей длины временного ряда. Исключением являлся пункт BZGN, наблюдения на котором начинались намного позже, чем единая общая дата начала наблюдений. Для этого случая была проведена линейная экстраполяция в прошлое с учетом тенденции его наблюдаемого движения. Более 40% длины общего интервала наблюдения для этой станции было получено путем линейной экстраполяции. Наиболее существенным недостатком было отсутствие наблюдательных данных на станции VAAN за 83 дня до и 19 дней после основного сейсмического события. Для этих временных интервалов данные были также получены путем линейной и эрмитовой сплайн-экстраполяции, предполагая гладкую траекторию до- и постсейсмических смещений соответственно. Это осложнило исследование возможных краткосрочных изменений до и после толчка, но не повлияло на оценку долгосрочных тенденций деформации в регионе.

Графическая визуализация наблюдательных данных была осуществлена для горизонтальных и вертикальных смещений земной поверхности, полученных непосредственно из временных рядов с сайта <http://geodesy.unr.edu/index.php>. Вертикальные смещения были рассчитаны относительно начальной эпохи GPS-наблюдений в системе отсчета IGS08. Векторы горизонтальных смещений были получены в локальной системе отсчета при условии отсутствия вращения/перемещения сети в целом. Это было достигнуто путем вычитания средних координат IGS08 всех станций GPS из координат каждой станции в каждом суточном решении. Таким образом, глобальный долгосрочный однонаправленный тренд был исключен из исследуемых смещений.

Полученные таким образом непрерывные временные ряды координат пунктов были использованы для определения деформаций земной поверхности с суточным временным разрешением.

Деформации были получены с использованием следующего алгоритма.

Плановые деформации были вычислены для треугольников триангуляции Делоне, представленной на рис. 2.

Для вычисления деформаций конечных элементов был использован тензор горизонтальной деформации (оси  $n$  и  $e$  направлены на север и восток):

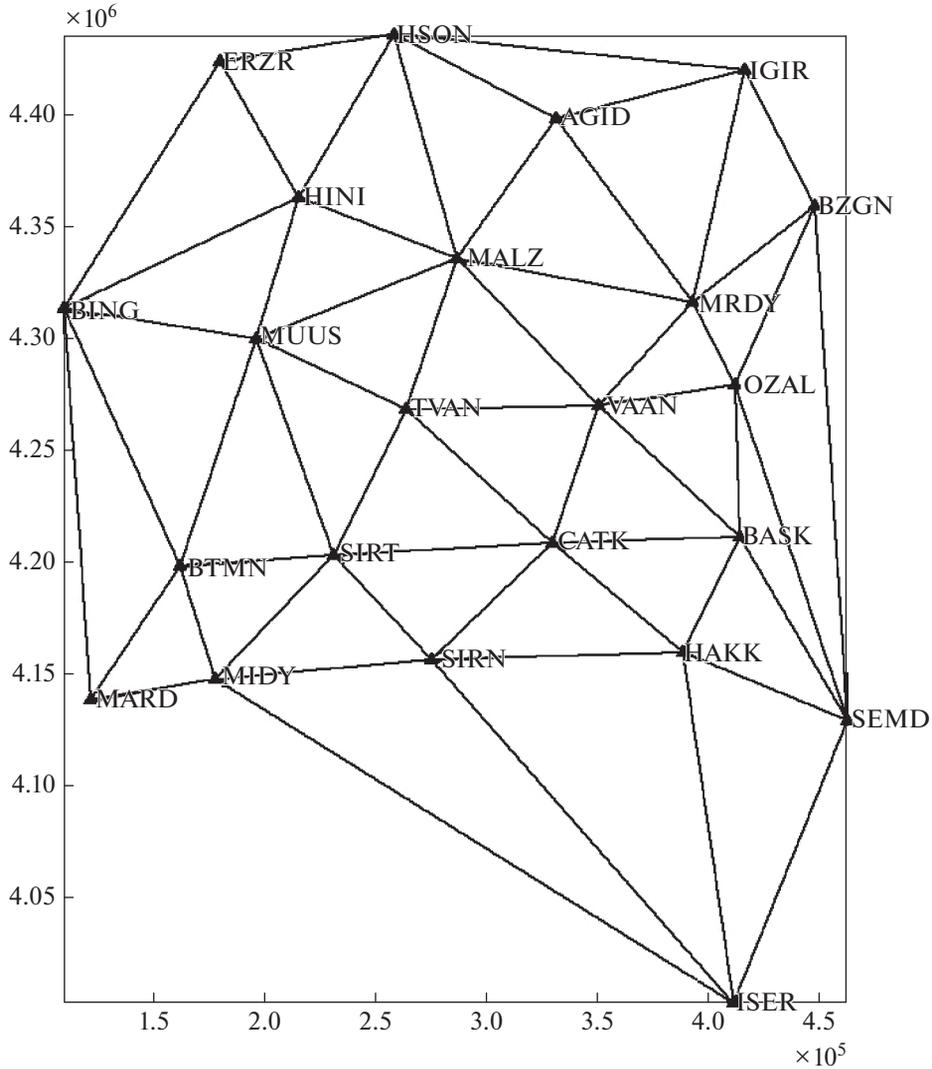


Рис. 2. Состав сети GPS-наблюдений. Черные треугольники – пункты GPS-сети. Прямые линии ограничивают конечные элементы деформационного анализа, сформированные триангуляцией Делоне.

$$T_\epsilon = \begin{pmatrix} \epsilon_n & \epsilon_{ne} \\ \epsilon_{en} & \epsilon_e \end{pmatrix},$$

элементы которого были равными  $\epsilon_n = \frac{\partial u_n}{\partial n}$ ,  $\epsilon_e = \frac{\partial u_e}{\partial e}$  и

$$\epsilon_{en} = \epsilon_{ne} = \frac{1}{2} \left( \frac{\partial u_n}{\partial e} + \frac{\partial u_e}{\partial n} \right) \text{ соответственно,}$$

где  $\frac{\partial u_n}{\partial e} + \frac{\partial u_e}{\partial n} = \gamma_{ne} = \gamma_{en}$  – относительный сдвиг.

Элементы тензора деформации формируются частными производными смещений  $u_n$  и  $u_e$  по осям координат  $n$  и  $e$ .

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

1) Главные деформации  $\epsilon_1$  и  $\epsilon_2$ :

$$\epsilon_{1,2} = \frac{1}{2} \left[ \epsilon_n + \epsilon_e \pm \sqrt{(\epsilon_n - \epsilon_e)^2 + \gamma_{ne}^2} \right].$$

2) Полный сдвиг:

$$\gamma = \left( (\epsilon_n - \epsilon_e)^2 + \gamma_{ne}^2 \right)^{1/2}.$$

3) Дилатация:

$$\Delta = \epsilon_1 + \epsilon_2.$$

Компоненты деформаций были вычислены по методу, описанному в работе [Wu et al., 2006].

Чтобы получить однородный набор данных, значения деформаций нормированы на среднюю площадь треугольника. Полученные значения масштабированных деформаций интерполиру-

ются на регулярную сетку с использованием эрмитовых сплайнов с помощью стандартной процедуры пакета программ Matlab. Таким образом, были получены схемы планового распределения дилатации и полного сдвига на заданные промежутки времени.

Кроме деформационных характеристик также анализировались величины полных смещений GPS-пунктов:

$$d = \sqrt{u_e^2 + u_n^2 + u_{up}^2}.$$

Чтобы проиллюстрировать характер временных изменений последовательных стадий деформации, были созданы анимации, демонстрирующие эволюцию деформации во времени (доп. материалы: Видео 1, Видео 2, Видео 3)<sup>1</sup>. Последовательность кадров с редкой повторяемостью, чем в фактическом расчете, показана на рис. 2–рис. 4. Полученные результаты позволяют интерпретировать развитие сейсмодеформационного процесса. Интерпретация представлена в следующих разделах.

#### ВРЕМЕННАЯ ЭВОЛЮЦИЯ ПЕРЕМЕЩЕНИЯ СТАНЦИИ VAAN

Определенный интерес к выяснению механизма движения земной поверхности вблизи эпицентра землетрясения Ван заключается в анализе поведения наиболее близкой к эпицентру землетрясения (21 км к юго-западу) станции VAAN. Траектория перемещения пункта VAAN в трехмерном пространстве показана на рис. 6. Траектория горизонтального перемещения станции (рис. 5а) показывает, что в пресеismicкой фазе медленное и однонаправленное горизонтальное движение станции происходило в направлении север–северо-восток в соответствии с региональной тенденцией движения земной коры. В полном соответствии с тенденцией перемещения Аравийской тектонической плиты. Косейсмическое быстрое смещение (рис. 6) продемонстрировало резкое перемещение на северо-запад с одновременным поднятием (рис. 6б). Постсейсмическое горизонтальное смещение в фазе постсейсмической релаксации (рис. 6а) было неожиданным, так как его направление оказалось обратным пресеismicкому. Вместо продолжения перемещения преимущественно в северном направлении, как этого требует региональная тенденция горизонтального сокращения литосферы, пункт VAAN испытал движение на юг–юго-запад, демонстрируя эффект “отталкивания” от некоего препятствия, при этом продолжая косейсмический подъем. Типичный ход продол-

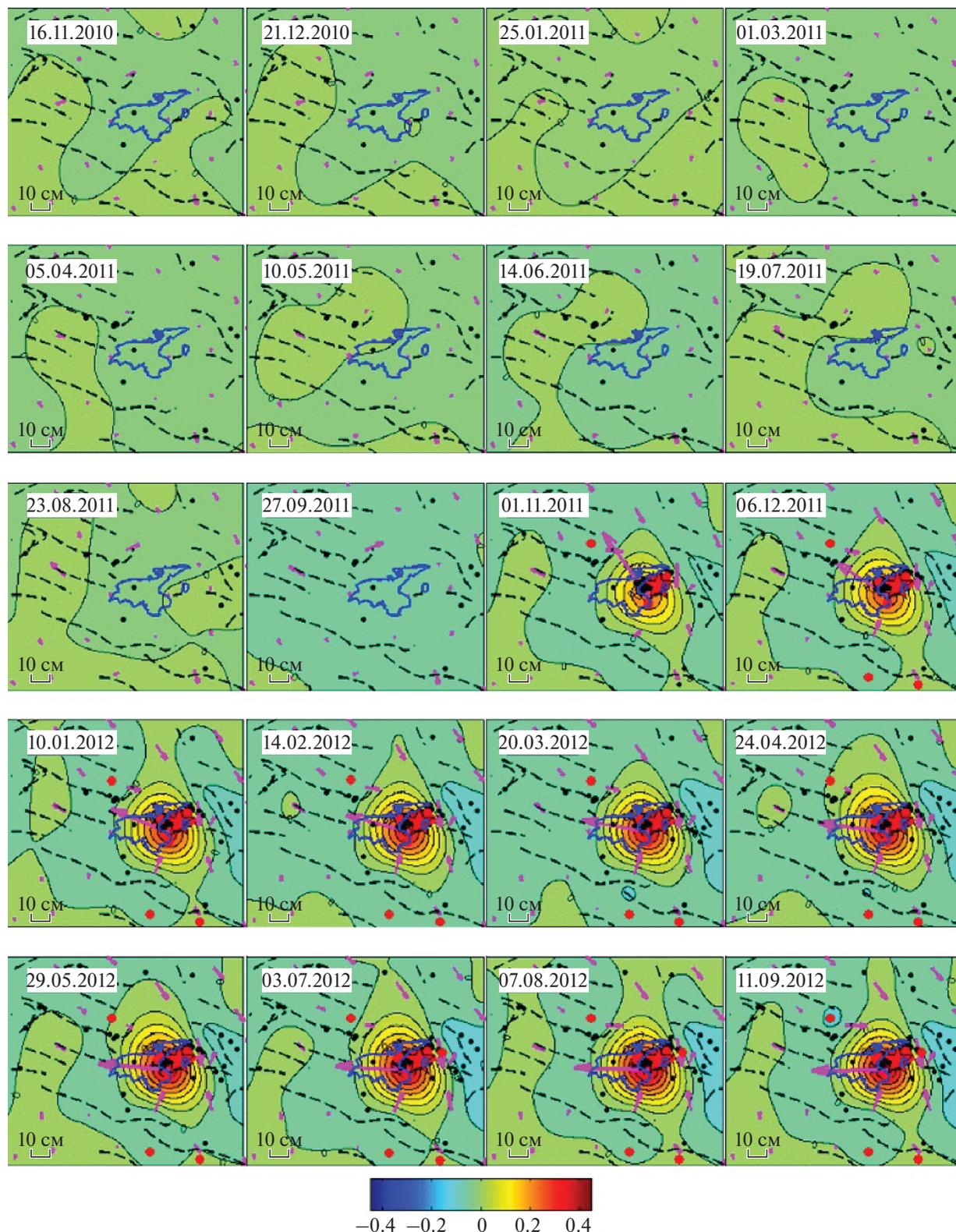
жения движения после крупного сейсмического события показан, например, в работе [Rodkin, Kaftan, 2017]. Эта наблюдаемая особенность требует изучения и объяснения, так как она противоречит широко распространенной модели упругой отдачи, согласно которой постсейсмическое смещение вблизи эпицентра продолжает досейсмический тренд ускоренно, в период релаксации и, постепенно замедляясь, переходит в межсейсмическую фазу, возвращаясь к однонаправленному вековому тренду.

Такой ход движения пункта возможен вследствие сейсмогравитационного эффекта. Но в районе расположения пункта рельеф равнинный, и это предположение не подтверждается продолжающимся подъемом территории. Вероятно, объяснение такого необычного движения пункта может представить изучение геометрических характеристик поверхности контакта вязкого и хрупкого слоев литосферы и динамики вязкого подкорового слоя.

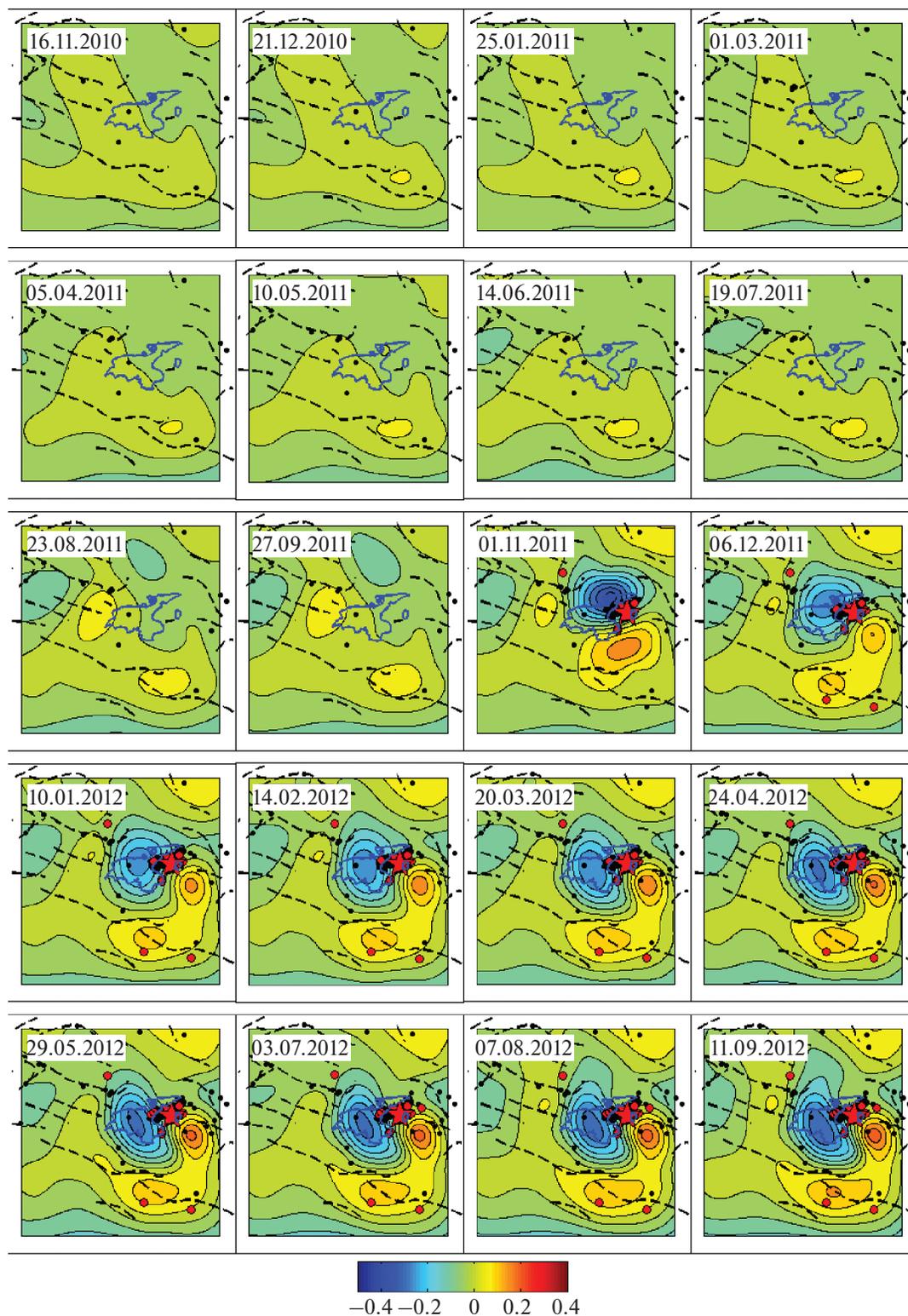
#### ИНТЕРПРЕТАЦИЯ ПРОЯВЛЕНИЯ ДЕФОРМАЦИОННЫХ ПРЕДВЕСТНИКОВ

Основной целью данного исследования является выявление деформационных предвестников землетрясения Ван. Автор работы [Mescherikov, 1968] впервые заметил существование таких предвестников. Модель Мещерякова, которая была позже развита другими авторами, была подтверждена данными повторного нивелирования в регионе Большого Кавказа [Kaftan, Ostach, 1996]. Модель представляет собой стандартную схему движений и деформаций земной поверхности в рамках сейсмического цикла, содержащую последовательные фазы медленного фонового тренда, ускоренных и пульсирующих изменений перед толчком, быстрого косейсмического сдвига, релаксации и восстановления фонового тренда. Деформационные предвестники были также обнаружены по GPS-наблюдениям в связи с сильными землетрясениями в последние десятилетия [Gu et al., 2009; 2011; Gu, Wang, 2011; Kaftan, Melnikov, 2017]. Автор работы [Roeloffs, 2006] обратил внимание на изменение скорости деформации в межсейсмический период перед сильными землетрясениями, показав, что этот вид предвестника не наблюдался перед некоторыми исследуемыми землетрясениями.

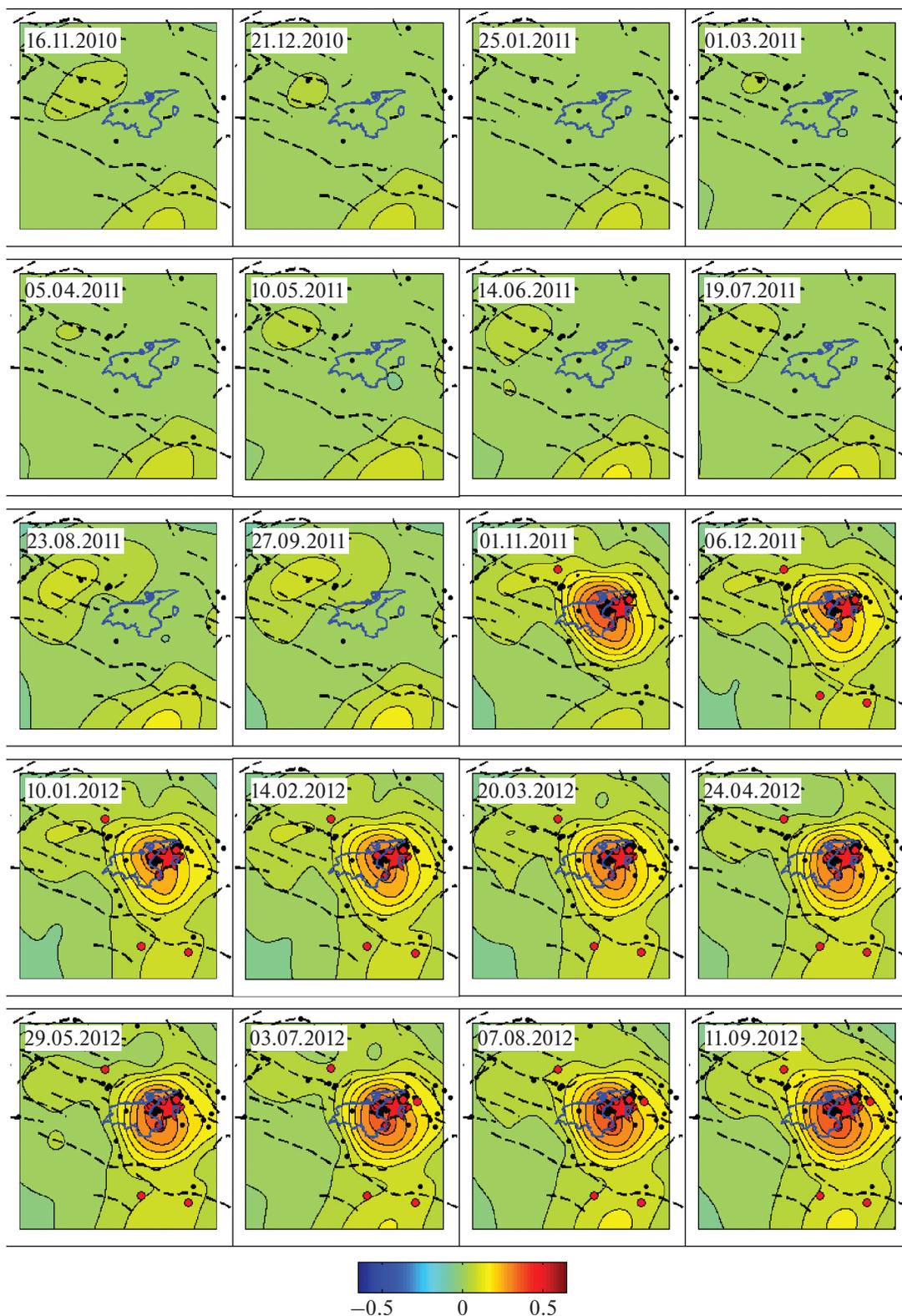
Можно отметить, что деформационные аномалии перед сильными землетрясениями не всегда обнаруживаются в эпицентральной зоне основного толчка и его афтершоков. Действительно, иногда такие деформационные аномалии возникают



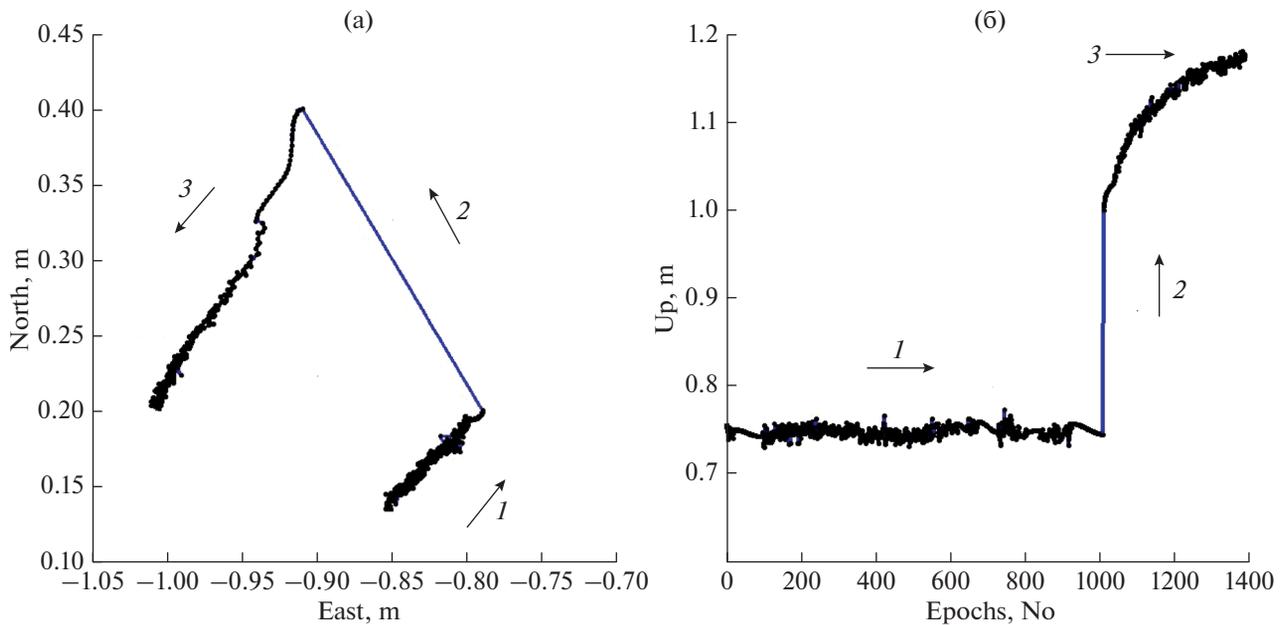
**Рис. 3.** Пространственное распределение накопленных от начальной эпохи горизонтальных (фиолетовые стрелки) и вертикальных смещений (изолинии) в досейсмический, косейсмический и постсейсмический периоды. Изолинии нанесены с интервалом 0.05 м. Звезда указывает эпицентр главного толчка. Крупные красные точки – эпицентры форшоков и афтершоков с  $M > 5$ . Маленькие черные точки – эпицентры толчков с  $4 < M < 5$ . Среднеквадратические ошибки значений смещений менее 0.01 м. Пунктирные черные линии обозначают зоны разломов. Контур оз. Ван показан синим цветом.



**Рис. 4.** Пространственное распределение дилатации в досейсмический, косейсмический и постсейсмический периоды. Изолинии нанесены с интервалами  $10^{-6}$ . Звезда указывает эпицентр главного толчка. Крупные красные точки – эпицентры форшоков и афтершоков с  $M > 5$ . Маленькие черные точки – эпицентры толчков с  $4 < M < 5$ . Среднеквадратические ошибки значений деформации меньше  $10^{-7}$ . Видеофильм представлен в дополнительном материале<sup>1</sup>.



**Рис. 5.** Пространственное распределение полного сдвига досейсмического, косейсмического и постсейсмического периодов. Изолинии нанесены с интервалами  $10^{-6}$ . Звезда указывает эпицентр главного толчка. Крупные красные точки – эпицентры форшоков и афтершоков с  $M > 5$ . Маленькие черные точки – эпицентры толчков с  $4 < M < 5$ . Среднеквадратические ошибки значений деформаций меньше  $10^{-7}$ . Видеофильм представлен в дополнительном материале<sup>1</sup>.



**Рис. 6.** Траектория пространственного перемещения пункта VAAN: (а) – горизонтальные движения; (б) – вертикальные движения. 1, 2 и 3 – пре-, ко- и постсейсмические фазы движений соответственно.

в десятках километров от эпицентра, что предположительно указывает на то, что область накопления сейсмогенерирующих деформаций превышает размер области афтершоков.

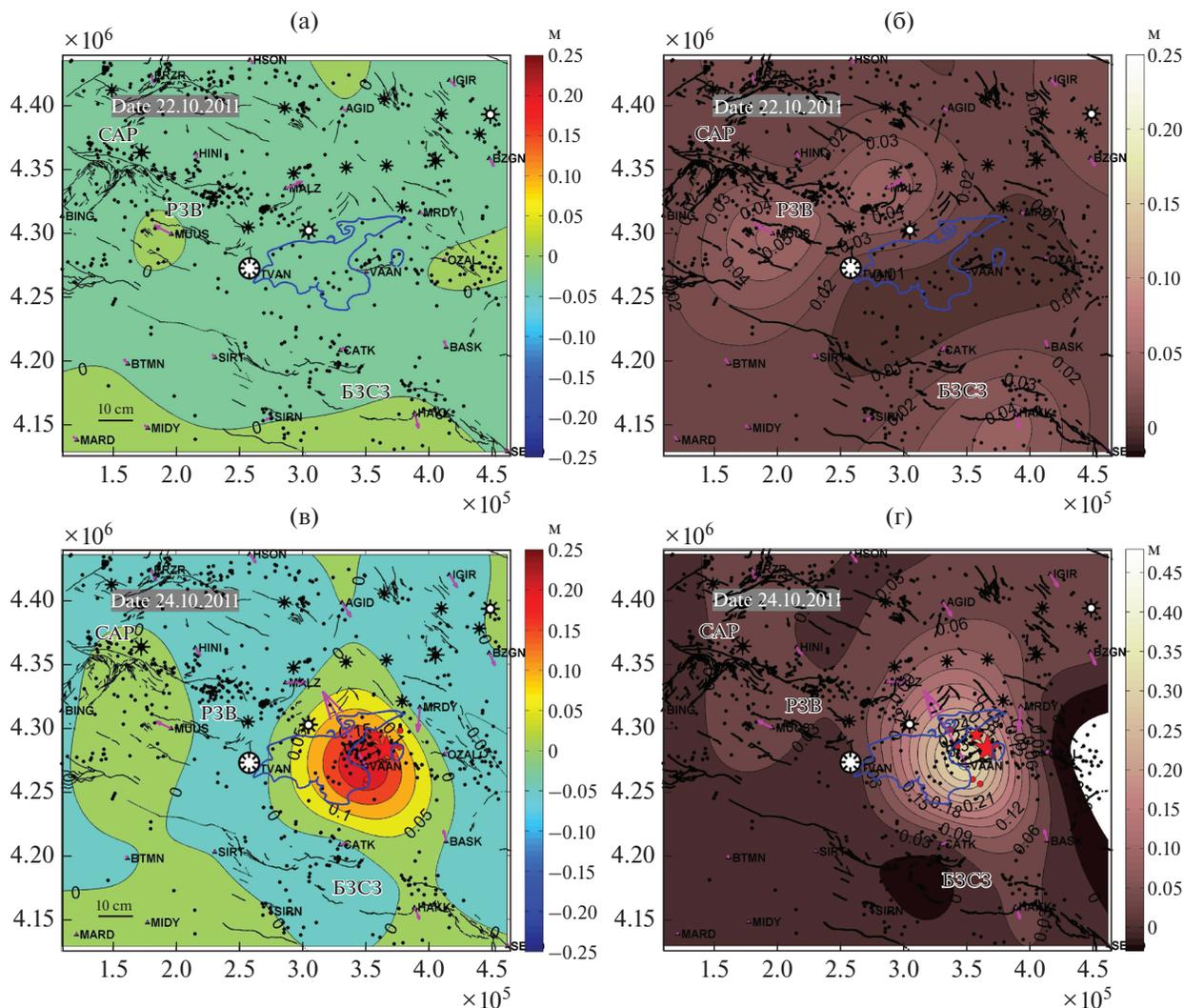
Рассматривая изменения горизонтальных и вертикальных смещений (рис. 3, рис. 7), можно видеть, что векторы предсейсмических смещений невелики и не демонстрируют явно выраженных аномалий. Тем не менее, можно заметить, что наибольшие перемещения происходят по обе стороны от продолжения зоны Северо-Анатолийского разлома (САР) на восток. Длина векторов смещения достигает нескольких сантиметров на станциях MALZ и MUUS. Здесь мы видим правостороннее движение точек на противоположных сторонах зоны САР одновременно с расширением этой области. Другой пункт, НАКК, который имеет наибольшее смещение, расположен (рис. 3, рис. 7) в районе структурной зоны Битлис–Загрос (БЗСЗ). Вертикальные смещения в этих регионах характеризуются слабыми поднятиями. Эти результаты показывают, что существует пространственная изменчивость деформаций перед землетрясением Ван.

Наиболее интересным, по мнению авторов, является поведение накопленных полных смещений GPS-станций (рис. 7б, 7г). За сутки перед главными точками в месте образования будущей эпицентральной зоны главных событий и афтершоков возникает область минимальных смещений. Это зона выражена темно-коричневой областью на

рис. 7б. Эта особенность не представляется неожиданной, так как в эпицентральной области перед сильными сейсмическими событиями часто образуется зона сейсмического затишья, что, в данном случае, отразилось и в характере поверхностных смещений. Заметим, что модель упругой отдачи Ф. Рейда требует минимальных смещений именно вблизи будущей разрывной зоны, а максимальных – на значительных удалениях от нее во время подготовки события.

Характер изменения дилатации (рис. 4) указывает на растяжения в областях к западу и югу от будущей эпицентральной зоны, прилегающей к зонам сжатия вблизи границ наблюдательной сети. Взаимосогласованный эффект растяжения и поднятия земной коры перед землетрясением подтверждает гипотезу о влиянии динамики подкоровой вязкой среды на подготовку землетрясения. Рисунки 8а и 8в показывают, что одно из самых больших растяжений за день до события вероятно связано с будущим быстрым скольжением. Экстремум растяжения сдвинулся на север после землетрясения, возможно, из-за перемещения вязкого сублитосферного субстрата в направлении очага землетрясения.

Вследствие землетрясения Ван и косейсмического смещения станции VAAN, в афтершоковой зоне сформировался дилатационный диполь, который со временем (примерно в течение месяца после главного события) поменял свою ориентировку с Ю–С на В–З. Предшествующая дефор-

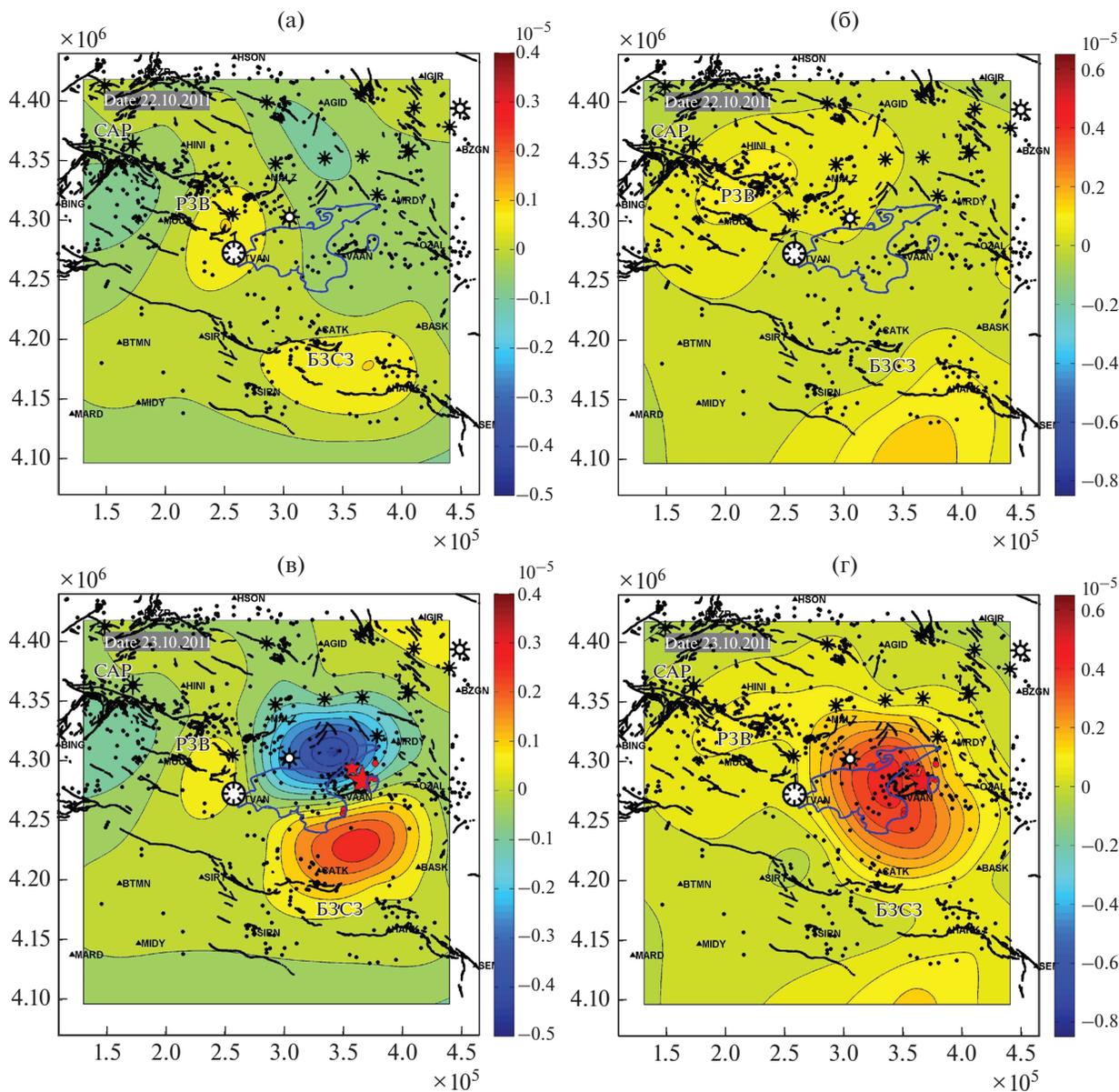


**Рис. 7.** Векторы горизонтальных движений (фиолетовые стрелки) и изолинии вертикальных смещений за день до толчка (а) и на следующий день (в). Изолинии полного смещения за день до толчка (б) и на следующий день (г). Черные линии – зоны разломов. Большие и маленькие красные звезды – главный толчок и самый сильный афтершок. Красные крупные точки – афтершоки  $M > 4.9$ . Черные точки – землетрясения  $3.0 < M < 5.0$ . Восьмилучевые черные звезды показывают активные (с белым центром) и неактивные вулканы.

мазия сдвига устремилась в единую общую зону с косейсмическим смещением после толчка (рис. 8б, 8г). Все перечисленные выше признаки подтверждают предположение о том, что движения и деформации, удаленные от будущего эпицентра, играют важную роль в накоплении деформации перед сейсмическим событием. Мы предполагаем, что отдаленные зоны аномальных деформаций являются предвестником землетрясения Ван.

Сегодня предвестники землетрясений имеют в своем составе различные аномалии геофизических полей, возникающие в зонах подготовки землетрясений [Bowman et al., 1988; Dobrovolsky et al., 1979]. Такими аномалиями являются пред-

шествующие землетрясению экстремальные характеристики поля деформации (главные деформации, сдвиг и дилатация) земной поверхности, величины которых превышают их фоновые оценки. В данном исследовании две деформационные неоднородности были зарегистрированы в северо-западной (разломная зона Варто – РЗВ) и юго-восточной (структурная зона Битлис–Загрос) частях исследуемого региона (рис. 3, рис. 4, рис. 8). Они обе расположены в области подготовки землетрясения, согласно [Dobrovolsky et al., 1979], и критической области, согласно [Bowman et al., 1988]. Скорости накопления деформаций изменяются от  $0.4 \times 10^{-6}/\text{год}$  до  $0.5 \times 10^{-6}/\text{год}$  с неопределенностью  $0.06 \times 10^{-6}/\text{год}$ .



**Рис. 8.** Изолинии дилатации (а), (в) и общего сдвига (б), (г) с интервалом  $5 \times 10^{-7}$ . Черные линии – зоны разломов. Большие и маленькие красные звезды – главный толчок и самый сильный афтершок. Красные крупные точки – афтершоки  $M > 4.9$ . Черные точки – землетрясения  $3.0 < M < 5.0$ . Восьмилучевые звезды указывают активные (с белым центром) и неактивные вулканы.

Эволюция деформации, представленная на рис. 3–рис. 5 и на сопровождающих видео<sup>1</sup>, показывает взаимную согласованность зарегистрированных досейсмических, косейсмических и постсейсмических изменений. На рис. 8 показана явная связь между до- и косейсмической деформацией. Существование и развитие предсейсмических дилатационных и сдвиговых аномалий в зоне разлома Варто и в структурной зоне Битлис, вероятно,

являются проявлениями предвестников последующего сильного события.

### ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Исследования движений и деформаций земной поверхности, в связи с землетрясением Ван, зарегистрированных с помощью GPS в Восточной Турции, позволяют нам сделать следующие основные выводы.

Амплитуда смещения станций MALZ, MUUS и НАКК достигает нескольких сантиметров за время наблюдения. Распределение горизонтальной компоненты смещений станций GPS демонстрирует сложный характер деформаций земной коры в исследуемом регионе. Отметим, что вертикальные смещения в этих областях характеризуются слабыми поднятиями.

Характер предсейсмического изменения дилатации указывает на растяжения в районах к западу и югу от будущей эпицентральной зоны, прилегающие к зонам сжатия вблизи границ наблюдательной сети. Эффект растяжения и поднятия до землетрясения не противоречит гипотезе о существовании сублитосферного вязкого слоя, который может играть определенную роль в сейсмическом процессе.

Эволюция движений и деформаций в исследуемой области демонстрирует вероятную связь между развитием аномальных деформаций в разломной зоне Варто и структурной зоне Битлис—Загрос с процессом подготовки землетрясения Ван. Это свидетельствует о том, что подготовительные деформационные процессы могут происходить на удалении от будущего сейсмического очага на десятки и сотни километров.

Характер накопления полных смещений GPS-пунктов перед главными событиями продемонстрировал область деформационного затишья, что демонстрирует перспективность анализа этих характеристик при разработке подходов к обнаружению мест будущих сильных землетрясений по данным пространственно-временного анализа движений и деформаций земной поверхности.

#### ФИНАНСИРОВАНИЕ РАБОТЫ

Работа выполнена в рамках государственного задания Геофизического центра РАН, утвержденного Минобрнауки России.

#### БЛАГОДАРНОСТИ

Авторы выражают искреннюю благодарность рецензентам, замечания которых способствовали существенному улучшению ясности и четкости изложения материала.

#### ДОПОЛНИТЕЛЬНЫЙ МАТЕРИАЛ

К этой статье прилагаются дополнительные материалы<sup>1</sup> в виде трех видео: Видео 1, Видео 2, Видео 3.

#### СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

- Делоне Б. Н.* О пустом шаре // Изв. АН СССР, серия физ.-матем. 1934. № 6. С. 793–800.
- Докукин П.А., Кафтан В.И., Красноперов Р.И.* Влияние формы треугольников в геодезической сети на результаты определения деформаций земной поверхности // Изв. ВУЗов. Геодезия и аэрофотосъемка. 2010. № 5. С. 6–11.
- AFAD (Disaster and Emergency Management Presidency of Turkey). Van depremi raporu. 2011. <https://deprem.afad.gov.tr/?lang=en>
- Altiner Y., Söhne W., Güney C., Perl J., Wang R., Muzli M.* A geodetic study of the 23 October 2011 Van, Turkey earthquake // Tectonophysics. 2012. V. 588. P. 118–134. <https://doi.org/10.1016/j.tecto.2012.12.005>
- Blewitt G., Hammond W.C., Kreemer C.* Harnessing the GPS data explosion for interdisciplinary science // Eos 99. 2018. <https://doi.org/10.1029/2018EO104623>
- Bowman D.D., Oullion G., Sammis C.G., Sorentte A., Sorentte D.* An observational test of critical earthquake concept // J. Geophys. Res. 1988. V. 103. № B10. P. 359–372.
- Bozkurt E.* Neotectonics of Turkey — a synthesis // Geodinamica Acta. 2001. V. 14. № 1–3. P. 3–30. <https://doi.org/10.1080/09853111.2001.11432432>
- Dobrovolsky I.P., Zubkov S.I., Miachkin V.I.* Estimation of the Size of Earthquake Preparation Zones // Pure Appl. Geophys. 1979. V. 117. № 5. P. 1025–1044.
- Emre Ö., Duman T., Özalp S., Elmacı H.* 23 Ekim 2011 Van depremi saha gözlemleri ve kaynak faya ilişkin ön değerlendirmeler. General Directorate of Mineral Research & Exploration (MTA), Ankara. 2011. V. 22. (in Turkish).
- Emre Ö., Duman T., Olgun Ş., Elmacı H., Özalp S.* 1/250000 ölçekli Türkiye Diri Fay Haritası Serisi. General Directorate of Mineral Research & Exploration (MTA), Ankara. 2012. (in Turkish).
- Gu G., Wang W., Xu Y., Li W.* Horizontal crustal movement before the great Wenchuan earthquake obtained from GPS observations in the regional network // Earthquake Science. 2009. V. 22. № 5. P. 471–478. <https://doi.org/10.1007/s11589-009-0471-x>
- Gu G., Meng G., Wang W.* Anomalous crustal movements before great Wechuan earthquake observed by GPS // Geodesy and Geodynamics. 2011. V. 2. № 2. P. 13–22. <https://doi.org/10.3724/SP.J.1246.2011.00013>
- Gu G., Wang W.* Far-field crustal movement before and after the 2011 Ms9.0 Japan earthquake from GPS observations // Geodesy and Geodynamics. 2011. V. 2. № 3. P. 1–7.
- Kaftan V., Melnikov A.* Local Deformation Precursors of Large Earthquakes derived from GNSS Observation Data // IOP Conference Series Earth and Environmental Science. 2017. V. 95(3). P. 03203. <https://doi.org/10.1088/1755-1315/95/3/032030>
- Kaftan V.I., Ostach O.M.* Vertical land deformation in Caucasus region // Earthquake Prediction Research. 1996. № 5. P. 235–245.
- Keskin M.* Magma generation by slab steepening and break off beneath a subduction accretion complex: An alternative

- model for collision-related volcanism in Eastern Anatolia, Turkey // *Geophys. Res. Lett.* 2003. V. 30. № 24. P. 8046. <https://doi.org/10.1029/2003GL018019>
- Koçyiğit A., Yılmaz A., Adamia S., Kuloshvili S.* Neotectonics of East Anatolian plateau (Turkey) and lesser Caucasus: implication for transition from thrusting to strike-slip faulting // *Geodinamica Acta.* 2001. V. 14. P. 177–195. <https://doi.org/10.1080/09853111.2001.11432443>
- Koçyiğit A., Özer M.F., Lenk O., Çolakoğlu Z., Çelebi M., Holzer T., Sharer K., Havskov J.* Report\_on\_October\_23\_2011\_Van\_Earthquake\_Mw7.0.pdf.2012. <http://www.deprem.gov.tr> (last access September 2012).
- Koçyiğit A.* New field and seismic data about the intraplate strike-slip deformation in Van region, East Anatolian plateau, E. Turkey // *J. Asian Earth Sciences.* 2013. V. 62. P. 586–605. <https://doi.org/10.1016/j.jseaes.2012.11.008>
- Mackenzie D., Elliott J.R., Altunel E., Walker R.T., Kurban Y.C., Schwenninger J.-L., Parsons B.* Seismotectonics and rupture process of the  $M_w$  7.1 2011 Van reverse-faulting earthquake, eastern Turkey, and implications for hazard in regions of distributed shortening // *Geophys. J. Int.* 2016. V. 206. P. 501–524. <https://doi.org/10.1093/gji/ggw158>
- Mescherikov J.A.* Resent crustal movements in seismic regions: Geodetic and geomorphic data // *Tectonophysics.* 1968. V. 6. P. 29–39. [https://doi.org/10.1016/0040-1951\(68\)90024-3](https://doi.org/10.1016/0040-1951(68)90024-3)
- Ozener H., Dogru A., Unlutepe A.* An Approach for Rapid Assessment of Seismic Hazards in Turkey by Continuous GPS Data // *Sensors.* 2009. V. 9. P. 602–615. <https://doi.org/10.3390/s90100602>
- Özkaymak Ç., Sözbilir H., Bozkurt E., Dirik K., Topal T., Alan H., Çağlan D.* 23 Ekim 2011 Tabanlı-Van Depreminin Sismik Jeomorfolojisi ve Doğu Anadolu'daki Aktif Tektonik Yapılarla Olan İlişkisi (Seismic Geomorphology of October 23, 2011 Tabanlı-Van Earthquake and Its Relation to Active Tectonics of East Anatolia) // *J. Geological Engineering.* 2011. V. 35. № 2. P. 175–200 (in Turkish).
- Roeloffs E.A.* Evidence for aseismic deformation rate changes prior to earthquakes // *Annu. Rev. Earth Planet. Sci.* 2006. V. 34. P. 591–627. <https://doi.org/10.1146/annurev.earth.34.031405.124947>
- Rodkin M.V., Kaftan V.I.* Post-seismic relaxation from geodetic and seismic data // *Geodesy and Geodynamics.* 2017. V. 8. P. 13–16. <https://doi.org/10.1016/j.geog.2017.01.001>
- Şengör A.M.C., Ozeren S., Zor E., Genç T.* East Anatolian high plateau as a mantle-supported, N-S shortened domal structure // *Geophys. Res. Lett.* 2003. V. 30. № 24. P. 8045. <https://doi.org/10.1029/2003GL017858>
- Tiryakioğlu I., Yavasoglu H., Uğur M. A., Özkaymak Ç., Yılmaz M., Kocaoglu H., Turgut B.* Analysis of October 23 ( $M_w$  7.2) and November 9 ( $M_w$  5.6), 2011 Van Earthquakes Using Long-Term GNSS Time Series // *Earth Sci. Res. J.* 2017. V. 21. № 3. P. 147–156. <https://doi.org/10.15446/esrj.v21n3.62812>
- Toker M., Şengör A.M.C., Schluter F.D., Demirbağ E., Çukur D., İmren C., Niessen F.* The structural elements and tectonics of the Lake Van basin (Eastern Anatolia) from multi-channel seismic reflection profiles // *J. Afr. Earth Sci.* 2017. V. 129. P. 165–178. <https://doi.org/10.1016/j.jafrearsci.2017.01.002>
- Wang C., Ding X., Li Q., Shan X., Zhu W., Guo B., Liu P.* Co-seismic and postseismic slip models of the 2011 Van earthquake, Turkey, from InSAR, offset-tracking, MAI, and GPS observations // *J. Geodyn.* 2015. V. 91. P. 39–50. <https://doi.org/10.1016/j.jog.2015.08.006>
- Wu J.C., Tang H.W., Chen Y.Q.* Effects of triangle shape factor on precision of crustal deformation calculated // *J. Geodesy Geodyn.* 2003. V. 23. P. 26–30. (in Chinese).
- Wu J.C., Tang H.W., Chen Y.Q., Li Y.X.* The current strain distribution in the North China Basin of eastern China by least-squares collocation // *J. Geodynamics.* 2006. V. 41. P. 462–470. <https://doi.org/10.1016/j.jog.2006.01.003>
- Zor E., Gurbuz C., Turkelli N., Sandvol E., Seber D., Barazangi M.* The crustal structure of the East Anatolian Plateau from receiver functions // *Geophys. Res. Lett.* 2003. V. 30. № 24. P. 8044. <https://doi.org/10.1029/2003GL018192>

## Crustal Motions and Strains in Eastern Turkey in Connection with the Van Earthquake (October 23, 2011, $M_w = 7.2$ ): Study from GPS Data

V. I. Kaftan<sup>a, \*</sup>, I. Kaftan<sup>b, \*\*</sup>, and E. Gök<sup>b, \*\*\*</sup>

<sup>a</sup>*Geophysical Center, Russian Academy of Sciences, Moscow, 119296 Russia*

<sup>b</sup>*Dokuz Eylül University, Izmir, 35390 Turkey*

\*e-mail: [kaftan@geod.ru](mailto:kaftan@geod.ru)

\*\*e-mail: [ilknur.kaftan@deu.edu.tr](mailto:ilknur.kaftan@deu.edu.tr)

\*\*\*e-mail: [elcin.gok@deu.edu.tr](mailto:elcin.gok@deu.edu.tr)

A devastating earthquake with magnitude  $M_w = 7.2$  occurred in the Van region, Eastern Turkey, on October 23, 2011. This study analyzes the characteristics of surface deformation before, during, and after the earthquake. The data of the  $300 \times 300$  km<sup>2</sup> permanent GPS network are used for quantitatively estimating surface deformations in the epicentral zone of the earthquake from January 16, 2009 to October 29, 2012 with daily time resolution. The dilatation, total shear, horizontal and vertical displacements are determined approximately

three years before and one year after the Van earthquake of 2011. The spatial distributions of strains for each day are combined into a video film for tracking the changes in the deformation process before and after the earthquake. Anomalous deformations are revealed a few months before the earthquake at a distance of about 100 kilometers from the future epicenter. The evolution of the motions and strains in the study region shows a probable connection of the evolution of the anomalous strains in the Varto fault zone and Bitlis–Zagros structural zone with the preparation of the Van earthquake. This suggests that the preparatory deformation processes can occur at a distance of dozens and hundreds km from the future seismic source.

*Keywords:* the  $M_w = 7.2$  Van earthquake of October 23, 2011, Eastern Turkey, surface deformations, GPS data