



Казахский Национальный Исследовательский Технический  
Университет,  
Институт Геологии и Нефтегазового Дела  
Кафедра “Геофизики”

# Сейсмогеофизические предвестники и стратегия прогнозирования землетрясений

## Лекция 12

**Предвестники по деформациям и движениям земной  
коры**

По материалам: В. И. Кафтан, И. Кафтан, Е. Гёк (2021)

**Преподаватель: Абетов Ауэз Егембердыевич – профессор,  
доктор геол.-мин. наук, академик НАН РК**

# Введение

## Исследование движений и деформаций земной коры Восточной Турции в связи с землетрясением Ван (23.10. 011 г., $M_w = 7.2$ ) с использованием данных GPS-наблюдений

### 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 со- держит 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 ранее уже были зафиксированы на значительных расстояниях от эпицентров сильных землетрясений.

Движения и деформации земной поверхности в сейсмоактивных регионах Турции детально исследуются на протяжении длительного времени. Анализируются временные ряды смещений земной коры и скоростей изменения главных деформаций пре-, ко- и постсейсмические движения. Модели ко- и постсейсмических деформационных процессов для землетрясения Ван были получены 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-

# Введение

наблюдений, выполненных в период с 16.01.2009 г. по 29.10.2012 г. Задачей является идентификация деформационных предвестников землетрясения Ван по GPS-измерениям с суточным временным разрешением и широким покрытием исследуемой территории, также исследованы постсейсмические деформации. Анализ пространственно-временных особенностей деформации земной поверхности в связи с землетрясением Ван и региональным сейсмическим режимом выполнен с использованием данных о разломной тектонике региона.

## **Тектоническая обстановка и региональная сейсмичность**

Восточная Анатолия характеризуется активной сейсмичностью и вулканизмом, обусловленными конвергенцией Аравийской и Евразийской плит. При этом тектоника региона характеризуется разломами со сдвиговым механизмом смещений в районе шовной зоны Битлис и надвигами в зоне складчатого надвигового пояса Загрос.

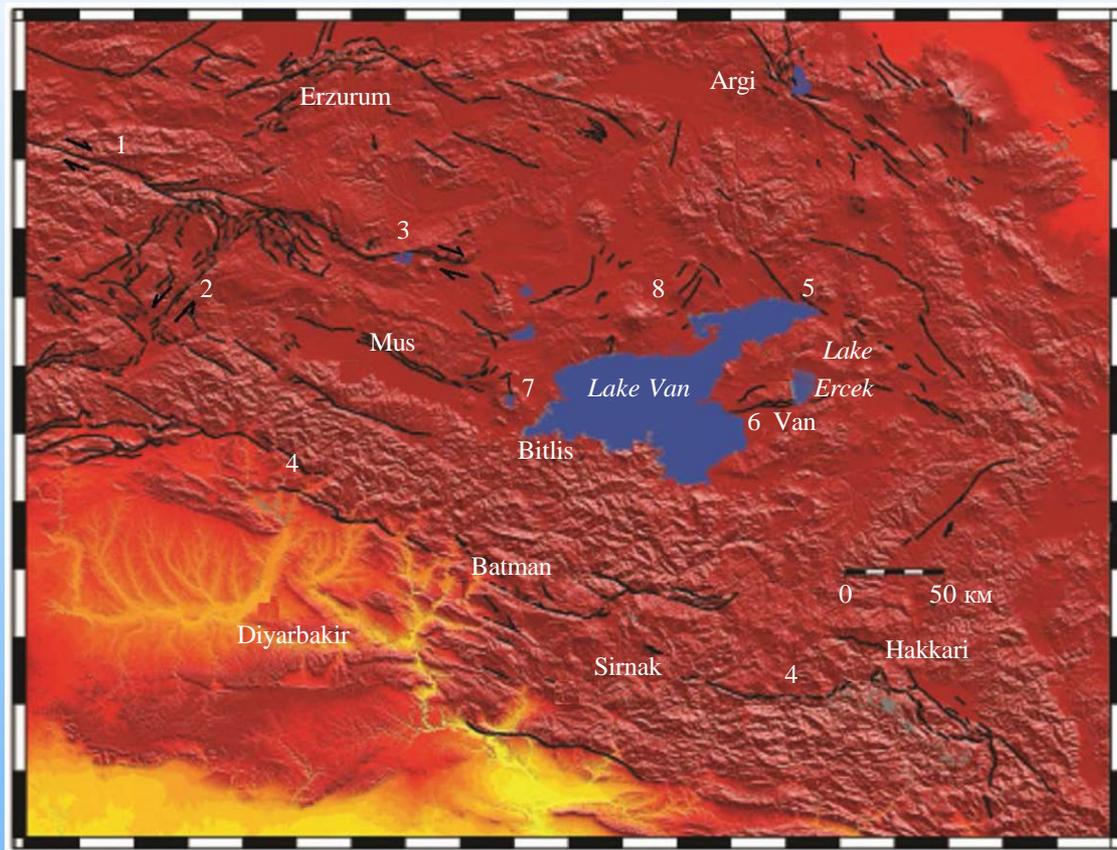
Основными тектоническими структурами региона являются: разломная зона Эрджиш, имеющая простирание с северо-запада на юго-восток и правосторонний сдвиговый механизм смещения; зона разлома Ван восточного простирания с надвиговым механизмом; структуры растяжения, связанные с вулканической деятельностью.

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.

Землетрясение Ван произошло 23.10.2011 г. в 10:41 UTC примерно в 20 км к северу от Ван, западнее оз. Эрчек в Восточной Анатолии. Моментная магнитуда и глубина землетрясения были 7.2 и 19.1 км соответственно. 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.

# Тектоническая обстановка и региональная сейсмичность



**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.

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

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.

# Тектоническая обстановка и региональная сейсмичность

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.

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.

Землетрясения в регионе были мелкофокусными и рассеянными. При этом GPS-наблюдения свидетельствуют о том, что сейсмичность протекает в условиях укорочения литосферы в направлении с севера на юг. Толщина коры, полученная из исследований методом 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 ман-тийном 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).

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

# Сеть GPS-наблюдений и первичные данные

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. Триангуляция Делоне максимизирует минимальный угол среди всех углов всех треугольников, избегая таким образом “тонких” треугольников.

В предыдущих исследованиях 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). 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  $s < 5$  мм, 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-

# Определение смещений и деформаций земной поверхности

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.

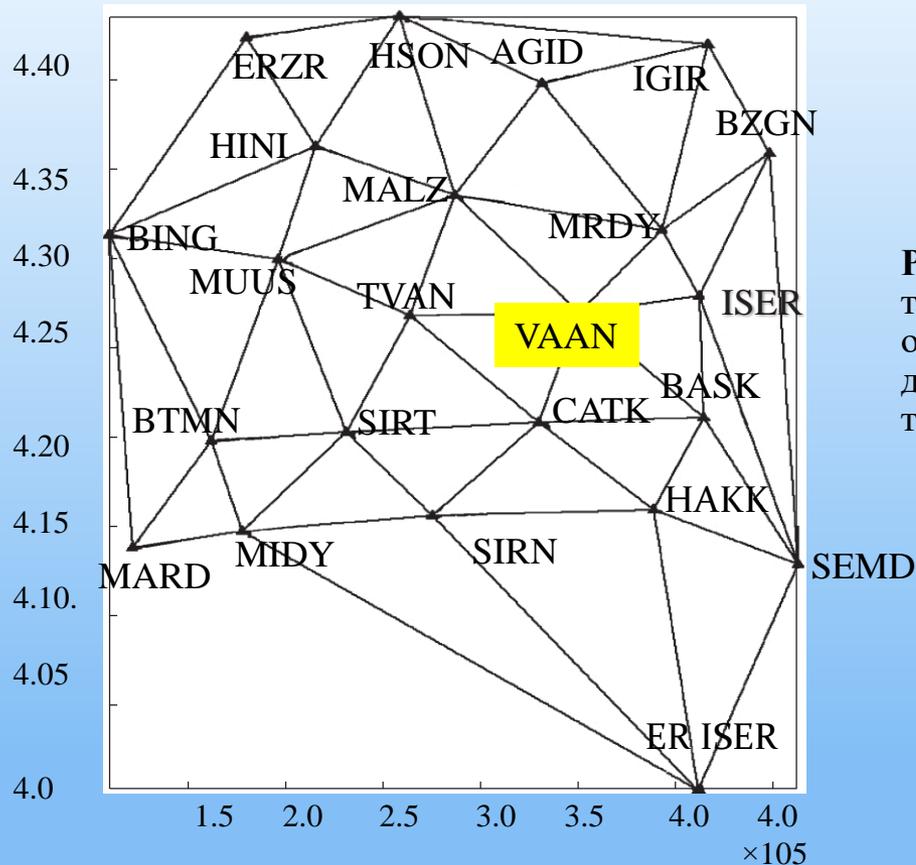
Графическая визуализация наблюдательных данных была осуществлена для горизонтальных и вертикальных смещений земной поверхности, полученных непосредственно из временных рядов. Вертикальные смещения были рассчитаны относительно начальной эпохи GPS-наблюдений в системе отсчета IGS08. Векторы горизонтальных 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.

# Определение смещений и деформаций земной поверхности



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

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

# Определение смещений и деформаций земной поверхности

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.

- Главные деформации  $e_1$  и  $e_2$
- Полный сдвиг;
- Дилатация.

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

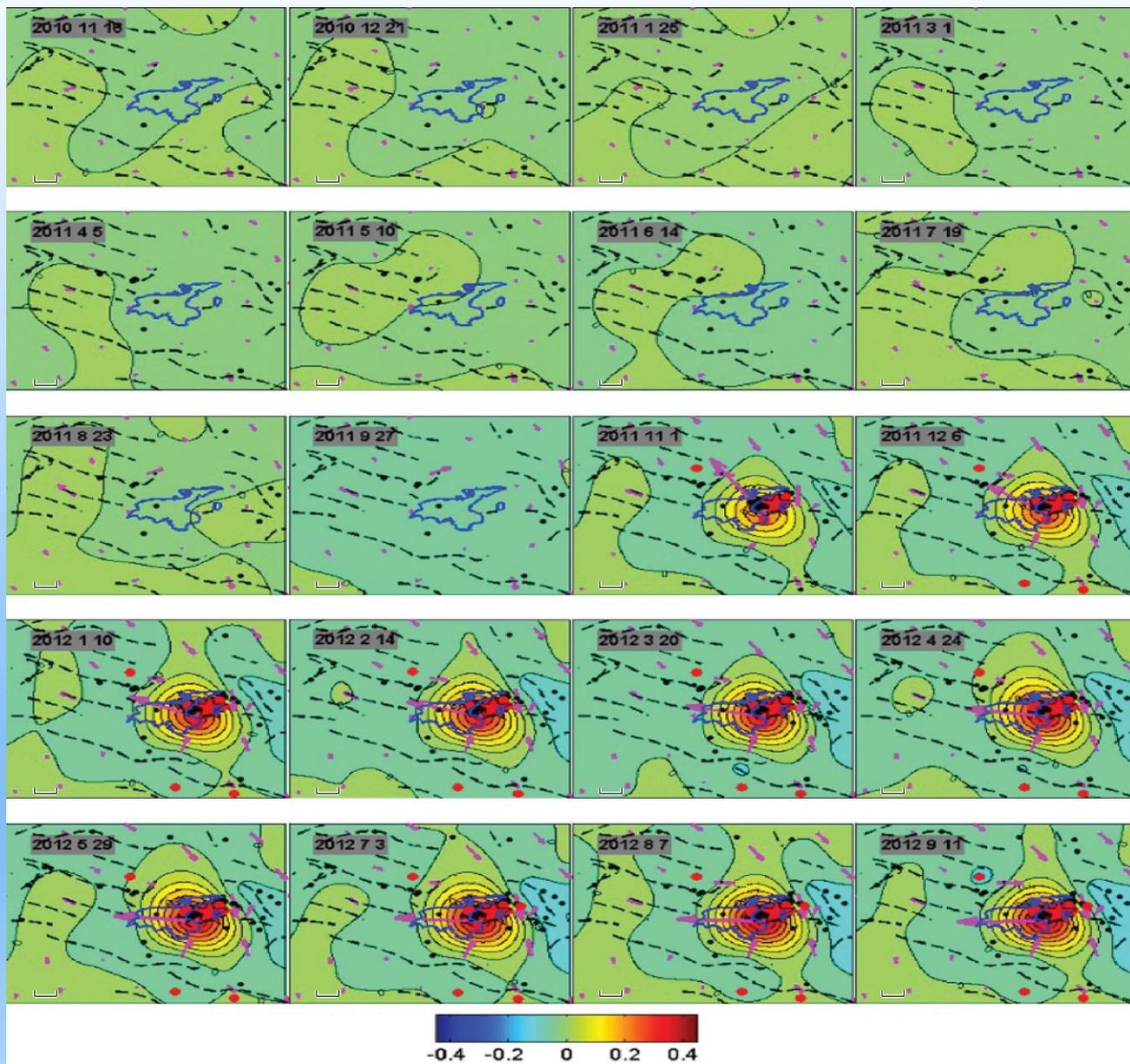
Кроме деформационных характеристик также анализировались величины полных смещений GPS-пунктов. Полученные результаты позволяют интерпретировать развитие сейсмодеоформационного процесса

## **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.

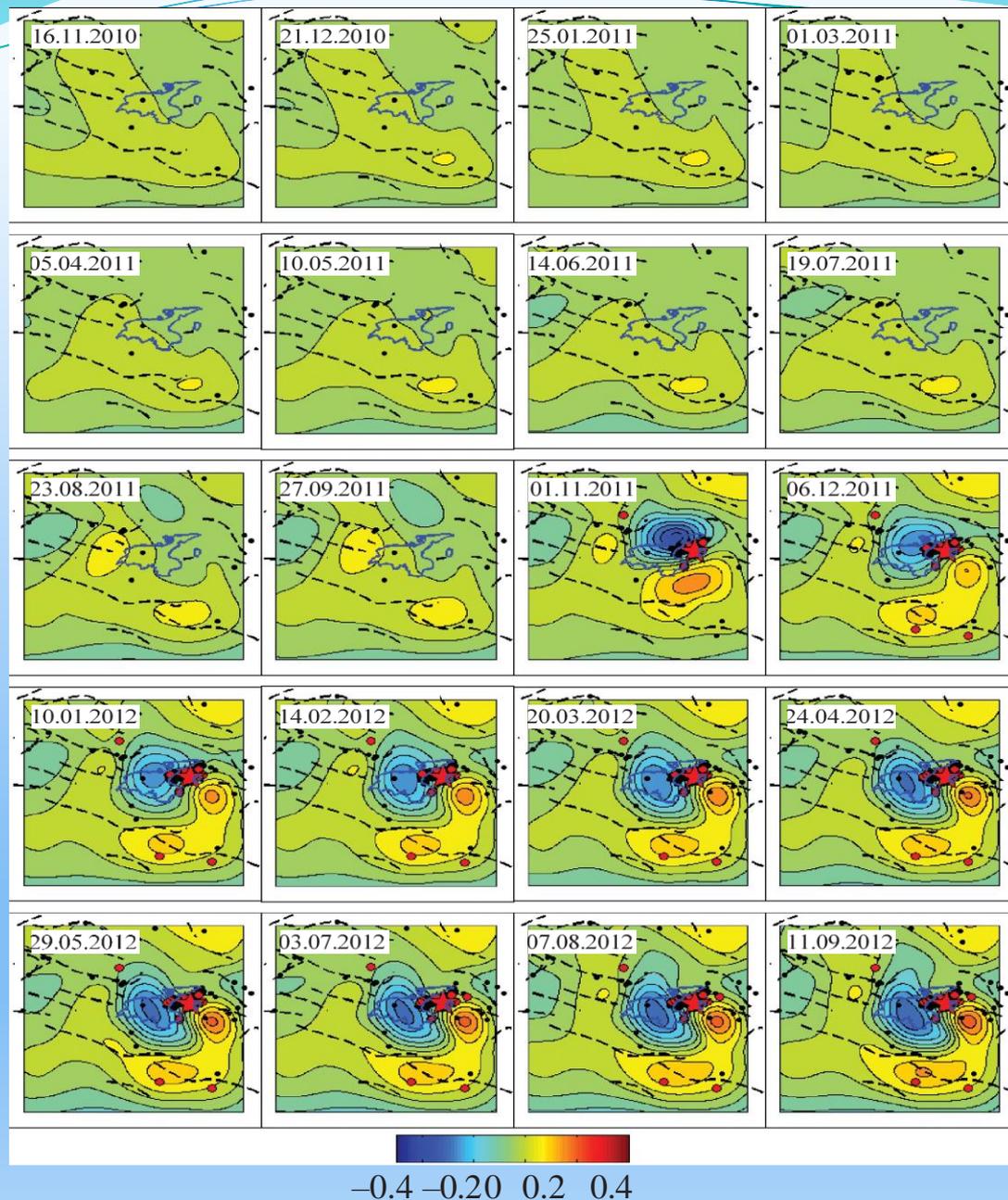
Траектория перемещения пункта VAAN в трехмерном пространстве показана на рис. 6. Траектория горизонтального перемещения станции (рис. 5а) показывает, что в пресеismicкой фазе медленное и однонаправленное горизонтальное движение станции происходило в направлении север–северо-восток в соответствии с региональной тенденцией движения земной коры.

# Временная эволюция перемещения станции VAAN



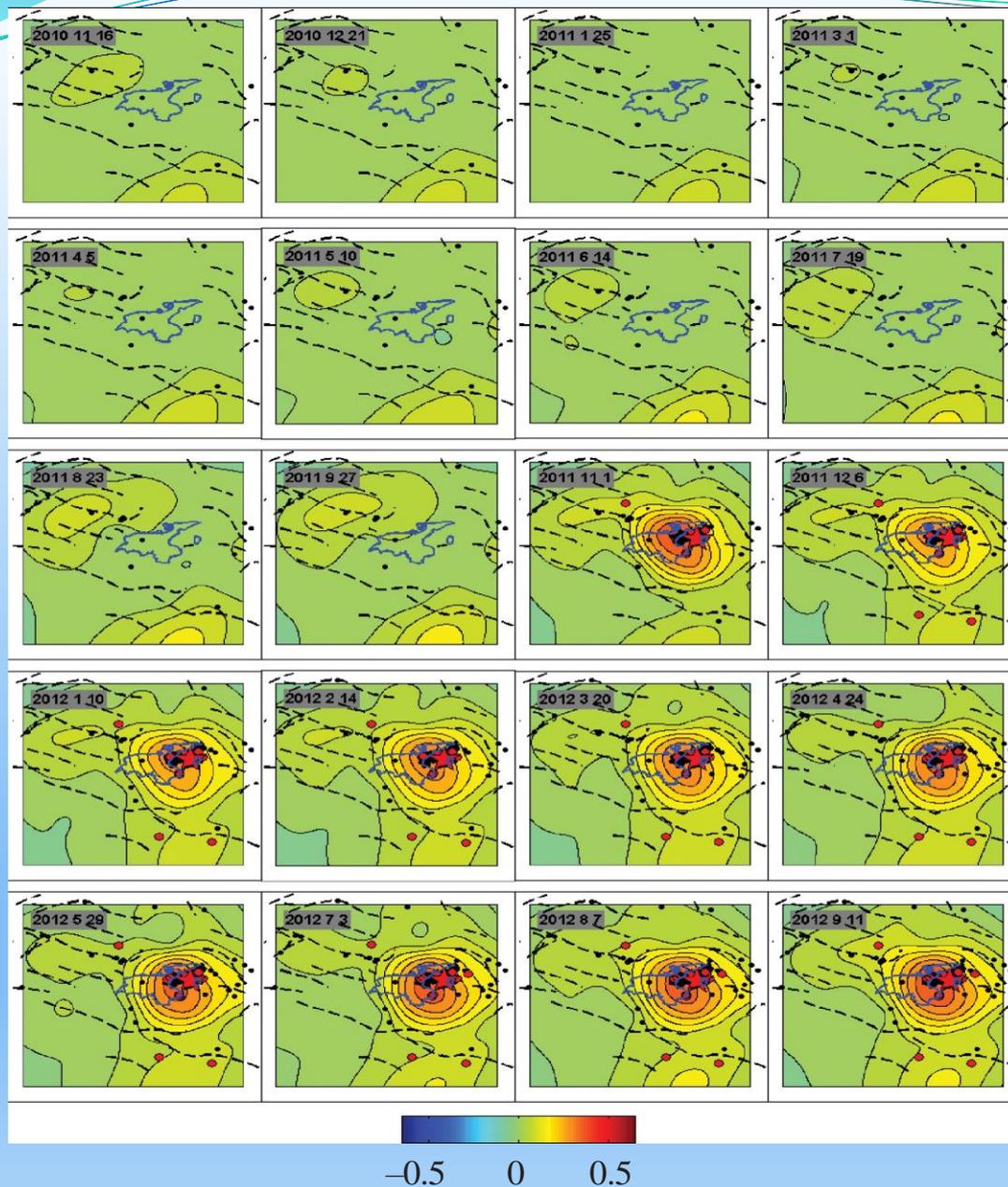
**Рис. 3.** Пространственное распределение накопленных от начальной эпохи горизонтальных (фиолетовые стрелки) и вертикальных смещений (изолинии) в досейсмический, косейсмический и постсейсмический периоды. Изолинии нанесены с интервалом 0.05 м. Звезда указывает эпицентр главного толчка. Крупные красные 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 по-казан синим цветом.

# Временная эволюция перемещения станции VAAN



**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.

# Временная эволюция перемещения станции VAAN



**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>.

# Временная эволюция перемещения станции VAAN

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.

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**

Деформационные предвестники землетрясений впервые заметил Мещеряков (1968). Его модель была позже развита другими авторами и 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.

# Интерпретация проявления деформационных предвестников

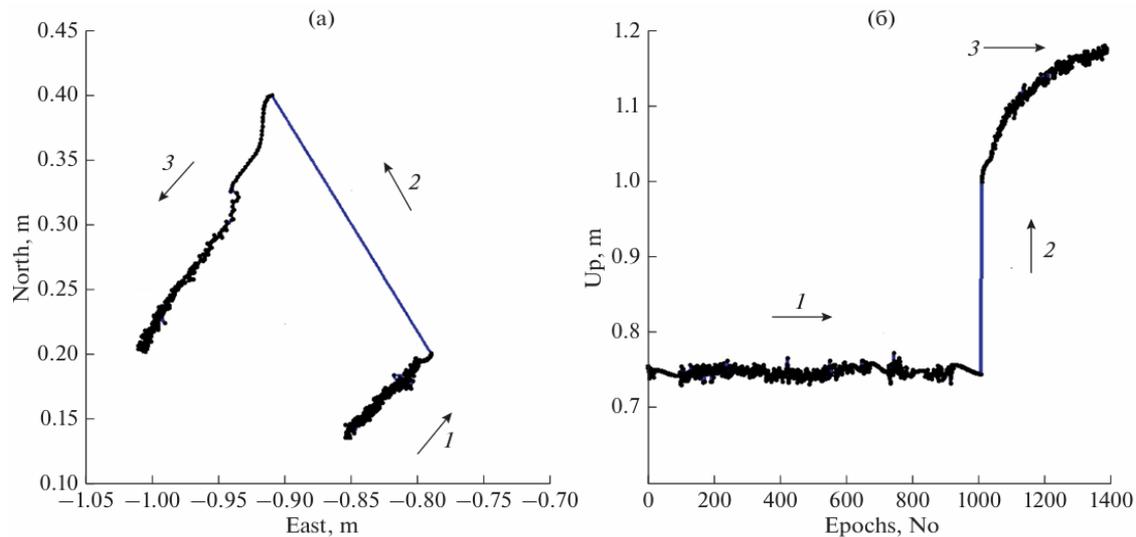


Рис. 6. Траектория пространственного перемещения пункта VAAN: (а) – горизонтальные движения; (б) – вертикальные движения. 1, 2 и 3 – пре-, ко- и постсейсмические фазы движений соответственно.

Деформационные предвестники были также обнаружены по GPS-наблюдениям в связи с сильными землетрясениями в последние десятилетия. 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 в десятках километров от эпицентра, что предположительно указывает на то, что область накопления сейсмогенерирующих деформаций превышает размер области афтершоков.

# Интерпретация проявления деформационных предвестников

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.

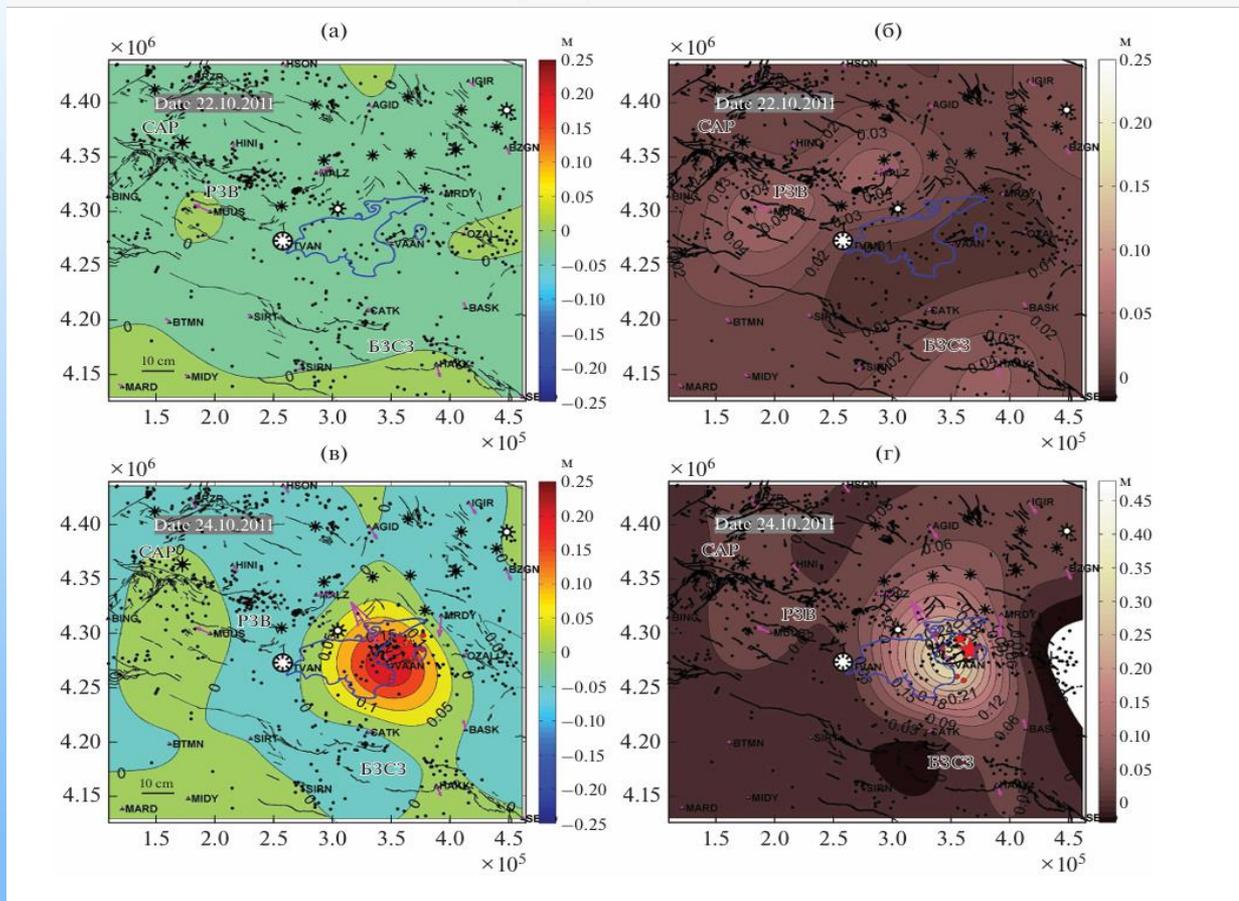
Другой пункт, НАКК, который имеет наибольшее смещение, расположен (рис. 3, рис. 7) в районе структурной зоны Битлис–Загрос (БЗСЗ). Вертикальные смещения в этих регионах характеризуются слабыми поднятиями. Эти результаты показывают, что существует пространственная изменчивость деформаций перед землетрясением Ван.

Наиболее интересным 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. Э

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 под-коровой вязкой среды на подготовку землетрясения.

# Интерпретация проявления деформационных предвестников



**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  $3.0 < M < 5.0$ . Восемилучевые черные звезды показывают активные (с белым центром) и неактивные вулканы.

# Интерпретация проявления деформационных предвестников

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 деформация 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. Такими аномалиями являются предшествующие 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, Скорости накопления деформаций изменяются от  $0.4 \times 10^{-6}/\text{год}$  до  $0.5 \times 10^{-6}/\text{год}$  с неопределенностью  $0.06 \times 10^{-6}/\text{год}$ .

# Интерпретация проявления деформационных предвестников

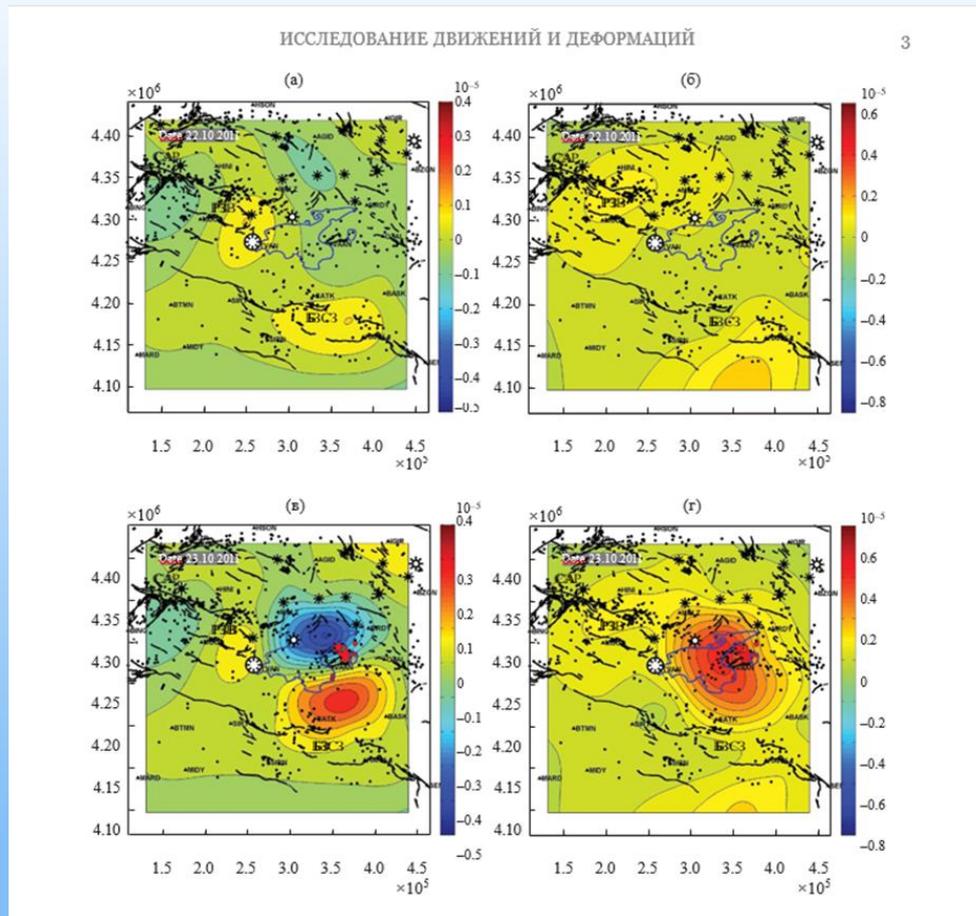


Рис. 8. Изолинии дилатации (а), (в) и общего сдвига (б), (г) с интервалом  $5 \times 10^{-7}$ . Черные линии – зоны разломов. Большие и маленькие красные звезды – главный толчок и самый сильный афтершок. Красные крупные точки – афтершоки  $M > 4.9$ . Черные точки – землетрясения  $3.0 < M < 5.0$ . Восьмилучевые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

Эволюция деформации, представленная на рис. 3–рис. 5 и на сопровождающих видео1, 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,

# Заключение

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 HAKK 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.

# Вопросы по закреплению содержания лекции 12

- ❑ Анализ движений и деформаций земной поверхности – один из наиболее эффективных современных методов исследования механизмов землетрясений. Временные ряды смещений земной коры и скоростей изменения главных деформаций пре-, ко- и постсейсмических движений.
- ❑ Тектоническая обстановка и региональная сейсмичность на примере Восточной Анатолии.
- ❑ Методика и сеть GPS-наблюдений и первичных данных. Метод триангуляции Делоне. Расчет вертикальных смещений.
- ❑ Определение смещений и деформаций земной поверхности. Плотность сети наблюдений на полигоне Ван.
- ❑ Параметры изучения пространственно-временного распределения горизонтальных деформаций
- ❑ Временная эволюция перемещения станции VAAN. Траектория перемещения пункта VAAN в трехмерном пространстве
- ❑ Пространственное распределение накопленных от начальной эпохи горизонтальных (фиолетовые стрелки) и вертикальных смещений (изолинии) в досейсмический, косейсмический и постсейсмический периоды.
- ❑ Пространственное распределение дилатации в досейсмический, косейсмический и постсейсмический периоды.
- ❑ Пространственное распределение полного сдвига досейсмического, косейсмического и постсейсмического периодов.
- ❑ Интерпретация проявления деформационных предвестников. Изменение скорости деформации в межсейсмический период перед сильными землетрясениями,
- ❑ признаки подтверждают предположение о том, что
- ❑ Роль движений и деформаций, удаленных от будущего эпицентра, в накоплении деформации перед сейсмическим событием на примере землетрясения Ван.

# Библиография

1. *Делоне Б. Н.* О пустом шаре // Изв. АН СССР, серия физ.-матем. 1934. № 6. С. 793–800.
2. *Altiner Y., Söhne W., Güney C., Perlt J., Wang R., Muzli M.* A geodetic study of the 23 October 2011 Van, Turkey earth-quake // *Tectonophysics*. 2012. V. 588. P. 118–134. <https://doi.org/10.1016/j.tecto.2012.12.005>
3. *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.
4. *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>
5. *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>.
6. *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>
7. *Keskin M.* Magma generation by slab steepening and break off beneath a subductionac creation 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>
8. *Koçyiğit A., Yılmaz A., Adamia S., Kuloshvili S.* Neotecton- ics of East Anatolian plateau (Turkey) and lesser Caucasus: implication for transition from thrusting to strike-slip fault- ing // *Geodinamica Acta*. 2001. V. 14. P. 177–195. <https://doi.org/10.1080/09853111.2001.11432443>
9. *Koçyiğit A.* New field and seismic data about the intraplate strike-slip deformation in Van region, East Anatolian pla- teau, E. Turkey // *J. Asian Earth Sciences*. 2013. V. 62. P. 586–605. <https://doi.org/10.1016/j.jseaes.2012.11.008>
10. *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>
11. *Roeloffs E.A.* Evidence for aseismic deformation rate chang- es prior to earthquakes // *Annu. Rev. Earth Planet. Sci.*

**Благодарю за внимание!**

**Thank you for your attention!**

**Назарларыңызға рахмет!**