Совместная интерпретация наземных и спутниковых данных для землетрясения Горха, Непал, 25.04.2015

В. О. Михайлов^{1,2}, Е. А. Киселева¹, Е. П. Тимошкина¹, В. Б. Смирнов^{2,1}, А. В. Пономарев¹, П. Н. Дмитриев¹, И. М. Карташов^{1,2}, С. А. Хайретдинов¹, К. Арора³, Р. Чадда³, Д. Шринагеш³

¹ Институт физики Земли им. О. Ю. Шмидта РАН, Москва, 123242, Россия E-mail: mikh@ifz.ru

² Московский государственный университет имени М. В. Ломоносова Москва, 119991, Россия

³ Национальный геофизический исследовательский институт Хайдарабад, 500007, Индия

Рассмотрены некоторые проблемы совместной интерпретации данных GPS и спутниковой радарной интерферометрии на примере землетрясения Горха в Непале 25.04.2015. Для анализа выбраны парные интерферограммы, полученные по снимкам спутника ALOS-2 ScanSAR, геометрия поверхности косейсмического разрыва построена по геофизическим и геологическим данным. При решении обратной задачи невязки по различным методам вычислялись с весами, обратно пропорциональными среднеквадратической погрешности каждого метода. Для GPS использованы погрешности, определённые для каждой станции; для радарной интерферометрии погрешность оценена по разности полей смещений, полученных по различным снимкам, в сумме перекрывающим один и тот же период времени. Поверхность разрыва аппроксимирована двумя наклонными плоскостями. Плоскости разбиты на более мелкие элементы. Для регуляризации обратной задачи использовано условие близости направления вектора смещений на каждом элементе поверхности разрыва к заданному направлению, а также условие, что модуль вектора смещения на каждом элементе близок к среднему значению по той плоскости, к которой он принадлежит. Получено, что основные смещения произошли вдоль поверхности Главного Гималайского надвига на глубинах 6–12 км. Построенная модель поверхности разрыва согласуется с имеющимися данными спутниковой геодезии и моделями, полученными другими методами и по другим группам данных, а также с имеющимися представлениями о геодинамике исследуемого района.

Ключевые слова: спутниковая геодезия, радарная интерферометрия, АЛОС, землетрясения, поверхность сейсмического разрыва, численное моделирование, Горха, Непал

Одобрена к печати: 31.07.2018 DOI: 10.21046/2070-7401-2018-15-4-119-127

Введение

В последние десятилетия в геофизике и геодинамике всё шире используются данные спутниковых систем наблюдений (глобальные навигационные спутниковые системы — ГНСС; спутниковые радары с синтезированной апертурой — РСА-интерферометрия и др.), которые позволяют с высокой точностью и детальностью оценивать поля смещений, в том числе в труднодоступных горных районах. Эти данные, в частности, используются для построения моделей поверхности сейсмического разрыва и оценки поля смещений на ней. При этом возникает нетривиальная проблема совместной интерпретации разнородных и разноточных наземных и спутниковых данных. Действительно, данные спутниковой геодезии (GPS, ГЛОНАСС) позволяют с высокой точностью оценить смещения на север, восток и по вертикали в отдельных точках земной поверхности. Данные РСА-интерферометрии характеризуют смещения на территориях площадью в несколько десятков квадратных километров, но смещения определяются в направлении на спутник, что затрудняет их непосредственное сопоставление с данными ГНСС. Кроме того, в данные РСА-интерферометрии необходимо вводить поправки на топографию и влияние атмосферы. Значительные помехи создаёт густая растительность и снежный покров. Наиболее эффективный метод интерпретации различных наземных и спутниковых данных — это решение обратной задачи в рамках геодинамической модели исследуемого процесса (Михайлов и др., 2007). Для сейсмических событий поверхность разрыва принято аппроксимировать набором прямоугольных элементов. В качестве функции Грина выступает решение задачи для поля смещений на поверхности упругого полупространства (Okada, 1985) или радиально расслоённой упругой сферы (Pollitz, 1996) в результате смещений по падению или по простиранию на каждом прямоугольном элементе, аппроксимирующем поверхность разрыва. В этом случае задача сводится к решению системы линейных уравнений относительно смещений по простиранию и по падению на каждой элементарной площадке. В случае когда геометрия поверхности разрыва неизвестна, её аппроксимируют небольшим количеством прямоугольных элементов и решают нелинейную обратную задачу определения размеров прямоугольников, их угла падения и простирания, а также смещений по падению и простиранию на каждом элементе (например, (Михайлов и др., 2010)).

Постановка обратной задачи определяется объёмом и качеством имеющихся данных. Так, для Олюторского землетрясения 20.04.2006 на Камчатке авторы располагали наземными данными о местах выхода сейсморазрывов на поверхность, несколькими парными интерферограммами, покрывающими область землетрясения и главных афтершоков, и сейсмологическими СМТ-решениями для них (Михайлов и др., 2018). Для Чуйского землетрясения 27.09.2003 на Алтае имелись ещё и данные повторных GPS-наблюдений, которые покрывали период сейсмического события и около 10 мес после него. ГНСС-данные позволили существенно уточнить модель поверхности сейсмического разрыва. Для землетрясений Горха 25.04.2015 в Непале объём данных существенно больше — радарные снимки спутников Sentinel-1A, ALOS-2, Radarsat-2, выполненные до и после землетрясения с восходящих и нисходящих треков; данные обширной сети GPS, включавшей информацию о косейсмических и постсейсмических смещениях. Это позволило построить парные интерферограммы для различных периодов времени, включающих главное событие и его наиболее сильный афтершок 12.05.2015 с магнитудой $M_w = 7,3$, исследовать косейсмические и постсейсмические процессы (см., например, Diao et al., 2015; Galetzka et al., 2015; Feng et al., 2016; Lindsey et al., 2015; Sreejith et al., 2016). (Отметим в скобках, что, хотя в литературе событие 12.05.2015 принято называть афтершоком, по соотношению магнитуды землетрясений 25.04.2015 и 12.05.2015 их следовало бы рассматривать как дублет.)

В данной работе на примере землетрясения Горха будут рассмотрены некоторые важные методические вопросы совместной интерпретации наземных и спутниковых данных для областей землетрясений.

Землетрясение Горха, Непал

Это разрушительное землетрясение магнитудой 7,8 произошло 25.04.2015. Его эпицентр, по данным Геологической службы США, располагался на глубине 15 км в районе Горха в 80 км от столицы Непала Катманду. В результате землетрясения погибло более 8800 человек и более 10 000 получили ранения (Feng et al., 2016). В течение месяца произошли многочисленные афтершоки, включая шесть событий с магнитудой $M_W > 6$. Наиболее сильный афтершок с $M_w = 7,3$ произошёл 12.05.2015 в 140 км от главного события на восточном окончании поверхности косейсмического разрыва. Геологические и геофизические данные показывают, что все смещения произошли вдоль глубинной части Главного Гималайского надвига, а в области его выхода на поверхность смещения ни по спутниковым, ни по наземным данным не зафиксированы.

Для построения карт смещений, вызванных землетрясением Горха, нами были использованы три снимка с нисходящей орбиты 48-го трека спутника ALOS-2 PALSAR-2 (мода ScanSAR — Wide Swath, длина волны 23,5 см) от 22.04.2015, 03.05.2015 и 22.05.2015, а также снимки со спутников Sentinel-1A (мода IW — Interferometric Wide, длина волны 5,6 см) с нисходящей орбиты 19-го трека (снимки 17.04.2015 и 29.04.2015) и 121-го трека (снимки 06.05.2015 и 18.05.2015) и восходящей орбиты 85-го трека (снимки 03.05.2015 и 15.03.2015).



Рис. 1. Дифференциальная интерферограмма в радарных координатах (*a*) и поле смещений в направлении на спутник (м) в географических координатах (*б*), полученные в результате расчётов по снимкам от 22.04.2015 и 03.05.2015 со спутника ALOS-2 ScanSAR (48-й трек, нисходящая орбита). Звёздочками показаны главное событие 25.04.2015 с $M_w = 7,8$ и афтершок 12.05.2015 с $M_w = 7,3$. Направление полёта и направление видения показаны в верхнем правом углу

При вычислении дифференциальных интерферограмм и для удаления топографической компоненты фазы была использована цифровая модель рельефа ASTER GDEM v2. Все расчёты были проведены в программном комплексе ENVI/SARScape. Полученные нами результаты подтверждают заключение (Diao et al., 2015) о том, что модели поверхности разрыва, получаемые по различным группам данных, хорошо согласуются между собой. Поэтому далее при рассмотрении методических вопросов мы ограничимся полем смещений, полученным по паре снимков спутника ALOS-2 от 22.04.2015 и 03.05.2015 (*рис. 1*). Максимальное смещение в направлении на спутник достигает 1,06 м восточнее г. Катманду, а максимальное смещение от спутника, равное -0,72 м, зафиксировано на север от г. Катманду.

Также нами были использованы данные станций GPS, установленных Калифорнийским технологическим институтом (Diao et al., 2015; Galetzka et al., 2015). Косейсмический скачок оценивался как разность средних значений за 5–10 дней до и 1–9 дней после землетрясения в зависимости он наличия данных. Среднеквадратическое отклонение реального временного ряда от найденной функции Хевисайда принималось за оценку погрешности GPS-измерений. Мы использовали данные с четырёх станций, горизонтальные смещения на которых были больше 1 см.

Постановка и метод решения обратной задачи

Для района землетрясения Горха имеются детальные геологические и геофизические данные, позволяющие задать геометрию поверхности сейсмического разрыва. Модель поверхности разрыва была построена с учётом данных сейсмических, геоэлектрических и геодезических исследований (Sreejith et al., 2016) и состояла из двух наклонных плоскостей. Верхняя кромка верхней плоскости располагалась на глубине 5 км, плоскость имела угол падения 5° и длину по падению 60 км. Нижняя плоскость примыкала к верхней на глубине 10,4 км, имела угол падения 16° и длину по падению 50 км. Длина по простиранию обеих плоскостей составляла 140 км. Верхняя плоскость была разделена на шесть частей по падению и шесть — по простиранию (шесть полос по шесть элементов в юго-западной части поверхности разрыва на *рис. 2*, см. с. 122); более глубокая плоскость была разделена на четыре элемента по падению и шесть — по простиранию. Всего получилось 60 элементов.



Рис. 2. Модель поверхности разрыва, построенная по снимкам спутника АЛОС-2 (см. *рис. 1*) (*a*). Геометрия задана по геологическим и геофизическим данным. Чёрные изолинии — смещения в направлении на спутник по данным спутниковой интерферометрии (м), цветовая шкала и коричневые изолинии — смещения в направлении на спутник, рассчитанные по модели поверхности разрыва. Прямоугольники — проекция элементов модели на земную поверхность. Зелёными стрелками показаны смещения на тех пунктах GPS, где они превосходили 1 см. Синие стрелки — смещения, рассчитанные по модели. Карта модуля вектора смещений на поверхности разрыва (м), полученная путём интерполяции значений смещения на каждом элементе модели (*б*). Синие стрелки — векторы смещений на смещений на смещение на социе и доверхности разрыва (м), полученая путём интерполяции значений смещения на каждом элементе модели (*б*). Синие стрелки — векторы смещений на смещение на оберхности разрыва (м), полученая путём интерполяции значений смещения на каждом элементе модели (*б*). Синие стрелки — векторы смещений на смещение на сме

элементах этой поверхности. Максимальное смещение на поверхности разрыва оценено в 4,9 м

Компоненты вектора смещений по падению и по простиранию на каждом элементе поверхности разрыва были определены путём минимизации функционала, состоявшего из среднеквадратической невязки модельных и реальных данных. Функционал включал невязку в смещениях на север и восток на пунктах GPS и невязку в смещениях в направлении на спутник в 1397 точках карты смещений, полученной по данным PCA-интерферометрии (см. *рис. 1*). Невязка по каждой группе данных нормировалась на число точек и свою среднеквадратическую погрешность. Для данных GPS это были указанные выше среднеквадратические отклонения от функции Хевисайда. Для PCA-интерферометрии в качестве оценки погрешности мы использовали среднеквадратическую норму разности между смещениями на спутник, определёнными за период 22.04.2015–03.05.2015 и рассчитанными как разность между смещениями за периоды 22.04.2015–22.05.2015 и 03.05.2015–22.05.2015. Иными словами, было использовано поле смещений, рассчитанное по паре снимков, включавших и главное событие, и афтершок 12.05.2015, минус поле смещений, рассчитанное по паре снимков, включавших только афтершок.

Несмотря на большой объём данных, обратная задача оказывается неустойчивой и требует применения регуляризирующих алгоритмов. В большинстве работ к функционалу невязки добавляется условие минимума нормы вторых производных от поля смещений, которые рассчитываются по методу конечных разностей. В данной постановке задача остаётся линейной по компонентам вектора смещений на элементах модели. При вычислении вторых производных возникает проблема задания смещений на внешнем периметре аппроксимирующей конструкции, т.е. если имеется N элементов по падению и M элементов по простиранию, то надо задать значения смещений на элементах с индексом 0, N + 1 и M + 1. Эти значения всегда полагают равными нулю. В результате поле смещений всегда будет иметь один или несколько экстремумов в пределах поверхности разрыва и будет плавно сходить к нулю на её границах. Если поверхность разрыва аппроксимировать несколькими сотнями элементов небольшого пространственного размера, получится решение, содержащее небольшие области значительных смещений. При интерпретации таких решений полагают, что сцепление на поверхности разрыва до землетрясения было неодинаково. На тех участках, где сцепление было наиболее сильным, накопились наибольшие напряжения, которые и привели к самым значительным смещениям. Эти области называют в английской литературе asperity; термин «асперити» начинает использоваться и в российской литературе.

Наличие крупных запертых участков зон субдукции, также называемых асперити, не вызывает сомнений. Это подтверждено многочисленными сейсмологическими и геодезическими данными. Однако существование относительно небольших запертых участков, которые препятствуют смещению больших по размерам отрезков разломов, выводится в основном из результатов моделирования полей смещений на разломах по данным наземной и спутниковой геодезии или по инверсии волновых форм в сейсмологии и может порождаться той регуляризацией, которая применяется при решении обратной задачи.

При решении обратной задачи нами использовано условие минимального отклонения вектора смещений от направления подвижки, определённого Геологической службой США, а также условие минимального отклонения модуля вектора смещений на элементах разбиения каждой плоскости от среднего значения по этой плоскости. Этот подход позволяет избегать резких изменений в поле смещений как по модулю, так и по направлению, а также исследовать зависимость получаемых решений от принятого метода регуляризации.

Независимо от принятой схемы регуляризации, все входящие в минимизируемый функционал компоненты (невязки по отдельным группам данным, критерии, выражающие условия, налагаемые на свойства искомого решения) умножаются на весовые множители, которые определяют, какой группе данных или какому условию придаётся доминирующее значение. Из литературы известен целый ряд методов оценки этих весовых коэффициентов, которые, однако, плохо работают при наличии нескольких групп разнородных данных. Главная проблема здесь в том, что в реальных ситуациях никакая теоретическая модель не может одинаково хорошо соответствовать всем группам данных и всем дополнительным условиям. Если, например, придать большой вес данным GPS, то можно найти гладкое решение, идеально соответствующее этим данным. (Напомним, что в нашем случае поверхность разрыва разделена на 60 элементов, т.е. решается система уравнений со 120 неизвестными, а GSP-данные по четырём станциям дают четыре смещения на север и четыре — на восток.) Но в этом случае возникают большие расхождения с данными РСА-интерферометрии. Нетрудно найти решение, хорошо соответствующее и PCA-, и GPS-данным, но поле смещений будет негладким, со смещениями в противоположных направлениях, что не соответствует представлениям о движениях по разломам.

Кроме того, не следует забывать, что модели, в рамках которых проводится интерпретация, не могут полностью соответствовать реальному процессу. Действительно, в нашем случае используется модель смещений по разрыву, расположенному в однородной или радиально расслоённой линейно-упругой среде с плоской или сферической верхней границей, а реальный район исследований — высочайшая горная система мира. Расстояние до Эвереста примерно равно длине поверхности косейсмического разрыва (см. *рис. 16*). Поэтому методически неоправданно увеличивать число элементов на поверхности разрыва до нескольких сотен и искать решение, соответствующее экспериментальным данным с точностью до миллиметров.

Результаты и их обсуждение

При поиске решений мы меняли весовые коэффициенты в широких пределах и искали решения, которые не содержали смещений, отклонявшихся от заданного направления более чем на 20° , с минимальными расхождениями в измеренных и вычисленных смещениях в точках задания данных GPS и PCA-интерферометрии. Полученное поле смещений на дневной поверхности приведено на *puc. 2a*, поле смещений на поверхности разрыва — на *puc. 2b*. Направление смещений (синие стрелки на *puc. 2b*) выдерживается достаточно хорошо, основные смещения концентрируются в центральной части поверхности разрыва на глубинах 6–12 км и достигают величины в 4,9 м. Однако расхождения в поле смещений на дневной поверхности десятков сантиметров.



Рис. 3. Модель поверхности разрыва для землетрясения Горха, содержащая 240 элементов. Обозначения те же, что и на *рис. 2.* На графике *а* дана дополнительная изолиния 0,1 м с целью показать, что модель в целом описывает выступ в поле смещений на СВ. Чтобы не перегружать рисунок, стрелки на графике *б* даны для элементов, где смещения превосходят 1 м

На *рис. За*, б приведён результат расчётов для модели, в которой размер элементов уменьшен в два раза по простиранию и по падению — всего 240 элементов, т.е. 480 неизвестных компонент векторов смещений.

Невязки в этой модели существенно ниже: максимальная невязка в поле PCA-смещений — менее 20 см, в GPS-смещениях на север и восток — 10,5 и 1,6 см соответственно. Среднеквадратические невязки для трёх групп данных составили 4, 6 и 1 см. На *рис. 3* в поле PCA-смещений дана дополнительная изолиния 0,1 м, которая показывает, что разрешение модели позволяет описать выступ в поле смещений на северо-востоке. Под ним располагается область почти нулевых смещений на поверхности разрыва. Максимальное смещение на поверхности разрыва в данной модели составило 6,1 м. Основные смещения также расположены в центральной части поверхности разрыва. В целом результаты, показанные на *рис. 2* и *3*, находятся в хорошем согласии. Ясно, что невязки можно ещё более снизить за счёт условий на поле смещений, но необходимость такого действия для нас не очевидна.

Выводы

Совместная интерпретация данных ГНСС и спутниковой РСА-интерферометрии позволяет получить информацию о строении поверхности сейсмического разрыва и о поле смещений на ней. Однако возникающие при этом обратные задачи являются неустойчивыми, и получаемые результаты могут в значительной степени определяться выбором стабилизирующего условия, добавляемого в минимизируемый функционал, и относительным весом входящих в этот функционал невязок по отдельным методам, а также весом стабилизирующего условия. В данной работе мы отказались от условия минимума нормы второй производной от поля смещений и заменили его условием близости направления векторов смещений на элементах модели к заданному направлению и условием малого отклонения модулей векторов смещений на элементах отдельных плоскостей, аппроксимирующих поверхность разрыва, от среднего значения по соответствующей плоскости. Полученные модели поверхности разрыва хорошо соответствуют спутниковым данным и представлениям о геодинамике исследуемого района.

Развиваемая нами альтернативная форма регуляризирующего функционала даёт результаты, которые хорошо согласуются со всем комплексом имеющихся данных. Эти результаты

могут быть в том числе использованы для оценки зависимости получаемых решений от принятого метода регуляризации.

Работа выполнена совместным российско-индийским проектом PHФ-DST India при финансовой поддержке Российского научного фонда (проект № 16-47-02003) и гранта Департамента науки и технологии Правительства Индии (INT/RUS/RSF/P-13). Авторы благодарят Японское космическое агентство JAXA за PCA предоставленные PCA-снимки.

Литература

- 1. *Михайлов В. О., Гордин В. М., Тимошкина Е. П., Киселева Е. А., Смольянинова Е. И.* Геодинамические модели и их применение при совместной интерпретации геологических и геофизических данных (обзор) // Известия РАН. Сер. «Физика Земли». 2007. № 1. С. 4–15.
- 2. Михайлов В. О., Назарян А. Н., Смирнов В. Б., Диаман М., Шапиро Н., Киселева Е. А., Тихоцкий С. А., Поляков С. А., Смольянинова Е. И., Тимошкина Е. П. Совместная интерпретация данных дифференциальной спутниковой интерферометрии и GPS на примере Алтайского (Чуйского) землетрясения 27.09.2003 // Физика Земли. 2010. № 2. С. 3–16.
- 3. *Михайлов В. О., Киселева Е. А., Арора К., Тимошкина Е. П., Смирнов В. Б., Чадда Р., Пономарев А. В., Шринагеш Д.* Новые данные об Олюторском землетрясении, полученные с применением спутниковой радарной интерферометрии // Вулканология и сейсмология. 2018. № 3. С. 64–69.
- Diao F., Walter T. R., Motagh M., Prats-Iraola P., Wang R., Samsonov S. V. The 2015 Gorkha earthquake investigated from radar satellites: slip and stress modeling along the MHT // Frontiers Earth Science. 2015. V. 3. P. 65. DOI: 10.3389/feart.2015.00065.
- Feng W., Lindsey E., Barbot S., Samsonov S., Dai K., Li P., Li Z., Almeida R., Chen. J., Xu X. Source characteristics of the 2015 M_W 7.8 Gorkha (Nepal) earthquake and its M_W 7.2 aftershock from space geodesy // Tectonophysics. 2016. V. 689. P. 40–55.
- 6. Galetzka J., Melgar D., Genrich J. F., Geng J., Owen S., Lindsey E. O., Xu X., Bock Y., Avouac J.-P., Adhikari L. B., Upreti B. N., Pratt-Sitaula B., Bhattarai T. N., Sitaula B. P., Moore A., Hudnut K. W., Szeliga W., Normandeau J., Fend M., Flouzat M., Bollinger L., Shrestha P., Koirala B., Gautam U., Bhatterai M., Gupta R., Kandel T., Timsina C., Sapkota S. N., Rajaure S., Maharjan N. Gorkha earthquake, Nepal Slip pulse and resonance of the Kathmandu basin during the 2015 // Science. 2015. V. 349. P. 1091–1095.
- Lindsey E. O., Natsuaki R., Xu X., Shimada M., Hashimoto M., Melgar D., Sandwell D. T. Line-ofsight displacement from ALOS-2 interferometry: Mw 7.8 Gorkha Earthquake and Mw 7.3 aftershock // Geophysical Research Lett. 2015. V. 42. No. 16. P. 6655–6661.
- 8. *Okada Y.* Surface deformation due to shear and tensile faults in a half-space // Bull. Seismological Society of America. 1985. V. 75. P. 1135–1154.
- 9. *Pollitz F.* Co-seismic deformation from earthquake faulting on a layered spherical Earth // Geophysical J. Intern. 1996. V. 125. P. 1–14.
- 10. *Sreejith K. M., Sunil P.S., Agrawal R., Saji A. P., Ramesh D. S., Rajawat A. S.* Coseismic and early postseismic deformation due to the 25 April 2015, Mw 7.8 Gorkha, Nepal, earthquake from InSAR and GPS measurements // Geophysical Research Lett. 2016. V. 43. P. 3160–3168.

Joint inversion of the GPS and SAR data for the Gorkha, Nepal earthquake of 25.04.2015

V. O. Mikhailov^{1,2}, E. A. Kiseleva¹, E. P. Timoshkina¹, V. B. Smirnov^{2,1}, A. V. Ponomarev¹, P. N. Dmitriev¹, I. M. Kartashov^{1,2}, S. A. Khairetdinov¹, K. Arora³, R. Chadha³, D. Srinagesh³

¹ Schmidt Institute of Physics of the Earth RAS, Moscow 123242, Russia E-mail: mikh@ifz.ru

² Lomonosov Moscow State University, Moscow 119991, Russia ³ CSIR-National Geophysical Research Institute, Hyderabad 500007, India

We discuss problems of joint inversion of GPS and SAR data using the Gorkha earthquake in Nepal on 25.04.2015 as an example. We applied DInSAR (pair interferogram) technique to the ALOS-2 ScanSAR satellite images. The geometry of the coseismic rupture was constrained by geophysical and geological data. When solving an inverse problem, the misfit of various methods was calculated with weights inversely proportional to the mean square error of each method. For GPS, we used the errors estimated for each station. For SAR interferometry, the error was estimated from the difference of the displacement fields obtained from three pair interferograms which in a total covered the same period of time. The model of the rupture surface contained two inclined planes, which were subdivided into a number of elements. The inverse problem was regularized by the condition of the proximity of the rake angle on each element of the rupture surface to a pre-assigned direction, and also the condition that the module of the displacement vector on each element of some plane is close to the average value over this plane. It is obtained that the main displacements occurred at the Main Himalayan thrust at depths of 6-12 km. Our rupture model agrees well with the available GPS and SAR data and with alternative models based on other methods and other data, as well as with the prevalent ideas on the geodynamics of the study area.

Keywords: satellite geodesy, SAR interferometry, ALOS-2, earthquake, surface of coseismic rupture, numerical modelling, Gorkha, Nepal

Accepted: 31.07.2018 DOI: 10.21046/2070-7401-2018-15-4-119-127

References

- 1. Mikhailov V. O., Gordin V. M., Timoshkina E. P., Kiseleva E. A., Smol'yaninova E. I., Geodynamic models and their application in the combined interpretation of geological and geophysical data (a review), *Izvestiya*. *Physics of the Solid Earth*, 2007, Vol. 43, No. 1, pp. 2–12.
- Mikhailov V. O., Nazaryan A. N., Smirnov V. B., Diaman M., Shapiro N., Kiseleva E. A., Tikhotskii S. A., Polyakov S. A., Smol'yaninova E. I., Timoshkina E. P., Joint inversion of the differential satellite interferometry and GPS data: A case study of Altai (Chuia) earthquake of September 27, 2003, *Izvestiya. Physics of the Solid Earth*, 2010, Vol. 46, No. 2, pp. 91–103.
- 3. Mikhailov V.O., Kiseleva E.A., Arora K., Timoshkina E.P., Smirnov V.B., Chadda R., Ponomarev A.V., Shrinagesh D., New Data on the Olyutorskii Earthquake Acquired via SAR Interferometry, *J. Volcanology and Seismology*, 2018, Vol. 12, No. 3, pp. 213–220.
- 4. Diao F., Walter T. R., Motagh M., Prats-Iraola P., Wang R., Samsonov S. V., The 2015 Gorkha earthquake investigated from radar satellites: slip and stress modeling along the MHT, *Frontiers Earth Sci.*, 2015, Vol. 3, p. 65, DOI: 10.3389/feart.2015.00065.
- Feng W., Lindsey E., Barbot S., Samsonov S., Dai K., Li P., Li Z., Almeida R., Chen. J., Xu X., Source characteristics of the 2015 M_W 7.8 Gorkha (Nepal) earthquake and its M_W 7.2 aftershock from space geodesy, *Tectonophysics*, 2016, Vol. 689, pp. 40–55.
- Galetzka J., Melgar D., Genrich J. F., Geng J., Owen S., Lindsey E. O., Xu X., Bock Y., Avouac J.-P., Adhikari L. B., Upreti B. N., Pratt-Sitaula B., Bhattarai T. N., Sitaula B. P., Moore A., Hudnut K. W., Szeliga W., Normandeau J., Fend M., Flouzat M., Bollinger L., Shrestha P., Koirala B., Gautam U., Bhatterai M., Gupta R., Kandel T., Timsina C., Sapkota S. N., Rajaure S., Maharjan N., Gorkha earth-

quake, Nepal Slip pulse and resonance of the Kathmandu basin during the 2015, *Science*, 2015, Vol. 349, pp. 1091–1095.

- Lindsey E. O., Natsuaki R., Xu X., Shimada M., Hashimoto M., Melgar D., Sandwell D. T., Line-of-sight displacement from ALOS-2 interferometry: Mw 7.8 Gorkha Earthquake and Mw 7.3 aftershock, *Geophysical Research Lett.*, 2015, Vol. 42, No. 16, pp. 6655–6661.
- 8. Okada Y., Surface deformation due to shear and tensile faults in a half-space, *Bull. Seismological Society of America*, 1985, Vol. 75, pp. 1135–1154.
- 9. Pollitz F., Co-seismic deformation from earthquake faulting on a layered spherical Earth, *Geophysical J. Inetern.*, 1996, Vol. 125, pp. 1–14.
- Sreejith K. M., Sunil P. S., Agrawal R., Saji A. P., Ramesh D. S., Rajawat A. S., Coseismic and early postseismic deformation due to the 25 April 2015, Mw 7.8 Gorkha, Nepal, earthquake from InSAR and GPS measurements, *Geophys. Res. Lett.*, 2016, Vol. 43, pp. 3160–3168.