

УДК 550.31

РЕКОНСТРУКЦИЯ КОСЕЙСМИЧЕСКИХ И ПОСТСЕЙСМИЧЕСКИХ ПРОЦЕССОВ ДЛЯ ЗЕМЛЕТРЯСЕНИЯ В ТУРЦИИ 06.02.2023 г. ПО ДАННЫМ РАДАРНОЙ СПУТНИКОВОЙ ИНТЕРФЕРОМЕТРИИ

© 2023 г. В. О. Михайлов¹, И. П. Бабаянц¹, М. С. Волкова¹ *,
Е. П. Тимошкина¹, В. Б. Смирнов^{1,2}, С. А. Тихоцкий¹

¹Институт физики Земли им. О.Ю. Шмидта РАН, г. Москва, Россия

²Московский государственный университет им. М.В. Ломоносова, физический факультет, г. Москва, Россия

*E-mail: msvolkova6177@gmail.com

Поступила в редакцию 12.06.2023 г.

После доработки 18.06.2023 г.

Принята к публикации 20.06.2023 г.

С применением различных методов обработки радарных снимков спутника Сентинель-1А определены поля смещений в области Восточно-Анатолийской зоны разломов (ВАЗР) и разломов Сюргу-Чардак, а также небольшого разлома на продолжении Восточно-Хатайской разломной зоны, смещения на котором инициировали серию катастрофических землетрясений в Турции 06.02.2023 г. Применены методы офсетов и дифференциальной интерферометрии DInSAR. Наиболее детальная картина смещений получена методом офсетов по снимкам с нисходящей орбиты. Из имеющегося набора данных для построения модели были выбраны результаты с максимальным отношением сигнал/шум. Для северной части области, выше 37.4° с.ш. использованы смещения по дальности, полученные методом офсетов с нисходящей орбиты. Южнее параллели 37.0° с.ш. использованы смещения по азимуту с той же нисходящей орбиты. Модель поверхности разрыва построена на основе решения задачи о деформациях поверхности сферически расслоенной планеты в результате смещений по падению и простираению на расположенной внутри нее прямоугольной площадке [Pollitz, 1996]. В этой работе показано, что игнорирование сферической расслоенности планеты приводит к ошибкам до 20%, при этом наибольшие ошибки возникают при наличии большой сдвиговой компоненты. Также ошибку вносит и игнорирование сферичности, при использовании решения в рамках идеализации упругого однородного полупространства с плоской свободной границей [Okada, 1985], на основе которой построены модели USGS и в работе [Varbot et al., 2023]. Поверхности сейсмических разрывов аппроксимированы 19 прямоугольными элементами по простираению, поделенными на три уровня по падению. Еще один элемент аппроксимировал разрыв на продолжении Восточно-Хатайской зоны разломов. Как и в моделях других авторов [USGS; Varbot et al., 2023], в построенной нами модели на южном участке ВАЗР величины смещений возрастают с юга на север, и в основном концентрируются в верхней части земной коры до глубины в 10 км. На южном окончании этого разрыва смещения в нашей модели с амплитудой до 2 м фиксируются на нижних уровнях модели, а на верхнем ее уровне смещения составили всего 0.11 м, и именно в этой области 20.02.2023 г. произошло землетрясение магнитудой 6.3 с глубиной гипоцентра 11.5 км. Основные смещения на ВАЗР определены на его центральном сегменте. Здесь смещения уходят на большую глубину, их величина достигает 10.2 м. На разломе Сюргу-Чардак существенные смещения произошли до глубины в 20 км; величина смещений превосходила 9.8 м. В нашей модели, на северо-восточном окончании сейсмического разрыва вдоль ВАЗР область смещений величиной 6.8 м перекрывается с юго-западным окончанием модели сейсмического разрыва землетрясения Доганьол–Сиврис (Doğanyol–Sivrice) 24.01.2020 г. с M_w 6.7, опубликованной на сайте USGS. Поэтому наша модель не подтверждает гипотезу о наличии здесь сейсмической брешы, которая согласно работе [Varbot et al., 2023] является зоной возможного ближайшего землетрясения.

Ключевые слова: землетрясение, Турция, 06.02.2023, Восточно-Анатолийская зона разломов, спутниковая интерферометрия, офсеты, модель поверхности разрыва, постсейсмические смещения.

DOI: 10.31857/S000233372306011X, EDN: ТОСJJZ

ВВЕДЕНИЕ

Активные тектонические процессы в Восточном Средиземноморье обусловлены взаимодей-

ствием Африканской и Аравийской литосферных плит и Анатолийского блока [McClusky et al., 2000; Ergin et al., 2004; Reilinger et al., 2006; и др.].

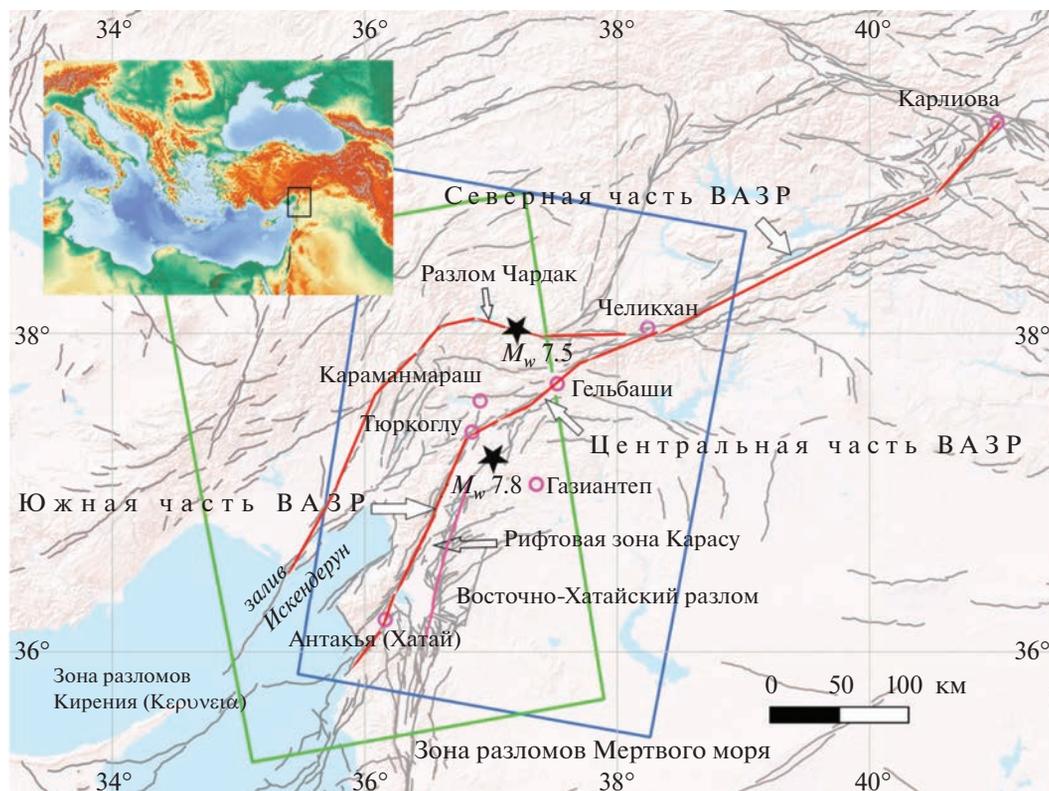


Рис. 1. Район катастрофических землетрясений в Турции 06.02.2023 г. (эпицентры отмечены звездочками). Черные линии – система активных разломов по базе данных ГИН РАН (<http://neotec.ginras.ru/database.html>). Красными линиями показаны разломы, которые обсуждаются в тексте. Прямоугольные области – контуры спутниковых снимков, покрывающие эпицентры землетрясений (синий цвет – нисходящая орбита, зеленый – восходящая). В качестве топографической основы использован ESRI Shadow Relief (Environmental System Research Institute). Сегменты Восточно-Анатолийского разлома, обозначенные стрелками: Южная часть ВАЗР (г. Антакья–г. Тюркоглу), Центральная часть ВАЗР (г. Тюркоглу–г. Челикхан), Северная часть ВАЗР (г. Челикхан–г. Карлиова). На вставке в левом верхнем углу прямоугольником показано положение района исследования на карте Восточного Средиземноморья.

Африканская и Аравийская плиты, двигаясь в сторону Евразийской плиты, вытесняют Анатолийский блок в западном направлении, движение которого происходит вдоль двух крупных сдвиговых разломов: правостороннего Северо-Анатолийского разлома и левостороннего Восточно-Анатолийского разлома [Milkereit et al., 2004]. Поскольку скорость движения Аравийской плиты больше, чем Африканской (18–25 мм/год и около 10 мм/год соответственно), то движение Анатолийского блока сопровождается вращением против часовой стрелки [McClusky et al., 2000; Reilinger et al., 2006; Xu et al., 2020].

Граница между Анатолийским блоком и Аравийской плитой проходит по Восточно-Анатолийской зоне разломов (далее ВАЗР) – одной из крупнейших внутриконтинентальных трансформных зон Восточного Средиземноморья (рис. 1). На севере ВАЗР соединяется с Северо-Анатолийским разломом в районе г. Карлиова. В пределах ВАЗР выделяется целая система разломов. Далее, для удобства дальнейшего изложения, мы услов-

но разделили ВАЗР на три сегмента, из которых северный сегмент протягивается от г. Карлиова до г. Челикхан (Çelikhan). В районе г. Челикхан от ВАЗР в западном направлении уходит система разломов Сюргю–Чардак (Sürgü–Çardak), продолжение которой постепенно поворачивает на юго-запад и соединяется с зоной разломов Кирения (Κερίνεια) в заливе Искендерун [Duman, Emre, 2013].

Центральный сегмент ВАЗР протягивается от г. Челикхан до г. Тюркоглу. Южный сегмент от г. Тюркоглу до г. Антакья совпадает с разломной зоной Карасу (Karasu), которая соединяется на юге с Кипрской дугой. На восток от зоны Карасу располагается Южно-Хатайская зона разломов, которая на юге соединяется с зоной разломов Мертвого моря [Özmen et al., 2017]. Между этими разломными зонами находится рифтовая зона Карасу, протяженностью 150 км и шириной примерно 25 км [Özmen et al., 2017].

В течение последнего столетия вдоль ВАЗР происходили серии землетрясений в основном

магнитудой 3.5–6.4, а за последние десятилетия в этой зоне не наблюдалось значительного усиления сейсмичности, превышающей магнитуду 6.7 [Bayrak et al., 2015; Xu et al., 2020]. Среди последних событий отметим три землетрясения, произошедших в районе г. Сиврис провинции Элязыг (Sivrice, Elazığ). Это событие Доганьол–Сиврис (Doğanyol–Sivrice) 24.01.2020 с магнитудой M_w 6.7, и два близко расположенных события 04.08.2020 г. и 27.12.2020 г. с магнитудами M_w 5.6 и 5.5 (данные Геологической службы США¹, USGS). Эти землетрясения произошли в той части ВАЗР, куда вдоль этого разлома дошла область вспарывания во время главного события 06.02.2023 г. с M_w 7.8.

Серия катастрофических землетрясений 06.02.2023 Караманмараш (Kahramanmaraş) началась в 01:17:34 (UTC) событием Пазарджык (Pazarcik) с магнитудой M_w 7.8 (USGS), за которым через 11 мин последовал афтершок магнитудой 6.7. Гипоцентр землетрясения располагался на глубине 17.5 км, в области с координатами 37.225 N, 37.021 E, на 35 км западнее города Газиянтеп (Gaziantep). Эпицентр определен на небольшом разломе, на северном продолжении Восточно-Хатайской разломной зоны (рис. 1). По данным USGS разрыв двигался на север, в направлении ВАЗР, и инициировал вспарывание, которое распространилось на северо-восток и юго-запад по ВАЗР, на расстояние более 100 км в каждом направлении.

Спустя 9 часов, в 10:24:49 (UTC), произошло второе крупное землетрясение с магнитудой M_w 7.5 на 90 километров севернее, на разломе Сюрюг–Чардак [Basili et al., 2013]. Гипоцентр определен на глубине 13.5 км, в точке с координатами 38.024 N, 37.203 E. Эти землетрясения инициировали многочисленные афтершоки вдоль всей зоны ВАЗР и стали самыми разрушительными в истории страны (см. данные Министерства по чрезвычайным ситуациям Турецкой республики – AFAD²). Наибольшие разрушения в результате первого землетрясения произошли в провинциях Караманмараш и Хатай, а второе землетрясение нанесло максимальный ущерб провинции Малатья. Землетрясения привели к появлению поверхностных разрывов и трещин, с преобладающими левосторонними сдвиговыми смещениями.

По данным AFAD в результате первого землетрясения поверхностный разрыв распространился на 290 км. На участке ВАЗР северо-восточнее г. Тюркоглу максимальные сдвиговые смещения достигали 5.5 метров. Разрыв второго землетрясения протянулся на 130 км. Здесь максимальные сдвиги достигли 6 м. Впоследствии также наблю-

дались обвалы горных пород, оползни и разжижение грунта. Из-за масштабных катастрофических разрушений жилых зданий и сооружений событие 06.02.2023 г. признано одним из самых катастрофических с начала XXI-го века. Оно занимает пятое место по количеству человеческих жертв. По данным USGS число погибших и раненных превысило 160000, 1.5 млн человек остались без крова, разрушено более 164 тыс. зданий.

Спутниковые технологии дистанционного зондирования поверхности Земли позволили оперативно исследовать обширную область землетрясений. В данной работе методами радарной интерферометрии, с использованием радарных снимков спутника Сентинель-1А, были определены поля смещений земной поверхности, построена модель поверхностей разрыва и определены косейсмические смещения на ней. Также исследованы постсейсмические смещения, в том числе в области землетрясения в районе г. Антакья 20.02.2023 г. с магнитудой M_w 6.3.

МЕТОДЫ ИССЛЕДОВАНИЯ

Спутниковая радарная интерферометрия позволяет оценивать смещения земной поверхности и объектов инфраструктуры с высокой точностью за время между двумя повторными снимками [Hanssen, 2001; Massonnet, Souyris, 2008]. Установленные на спутниках радиолокаторы с синтезированной апертурой (РСА, англ. SAR) формируют амплитудно-фазовые изображения независимо от погодных условий и освещенности, что делает данную технологию незаменимой при мониторинге природных и техногенных процессов. Снимки спутника Сентинель-1А выполняются с интервалом 12 дней и становятся доступны в базе данных европейского космического агентства (ЕКА) через несколько часов после съемки. В отличие от наземных методов, которые основаны на обследовании относительно небольших районов, РСА интерферометрия позволяет создавать карты деформации земной поверхности, которые охватывают очень большие территории. Например, размеры снимка спутника Сентинель-1А достигают 200 × 250 км. В данной работе для оценки полей смещений по спутниковым радиолокационным снимкам мы использовали метод дифференциальной интерферометрии (DInSAR), и также метод офсетов, называемый в англоязычной литературе “*amplitude tracking*” или “*sub-pixel offset techniques*” (например, [Michel et al., 1999]).

Метод DInSAR позволяет определять смещения земной поверхности по разности фаз радиолокационного сигнала, отраженного от элемента разрешения в два различных момента времени. Значение фазы фиксируется вдоль направления излучения электромагнитной волны, соответственно величины смещений измеряются в про-

¹ <https://earthquake.usgs.gov/earthquakes/>

² <https://depem.afad.gov.tr/home-page>

екции на линию распространения радарного сигнала (направление видения, англ. *line-of-sight*, LOS). Для расчета смещений необходимо, чтобы снимки коррелировали между собой. Мерой корреляции является коэффициент когерентности, который меняется в пределах от 0 до 1. Эффект декорреляции, которому соответствуют низкие значения когерентности, возникает, в том числе, из-за резких изменений рельефа, связанных с сильными смещениями, например, при землетрясении. Кроме того, разность фаз отраженных сигналов находится в диапазоне от $-\pi$ до π . При расчете полей смещений возникает необходимость развернуть свернутую по модулю 2π фазу. Развертка, состоящая в прибавлении к зарегистрированной фазе необходимого числа полных периодов, является операцией неоднозначной, поэтому она проводится под условием, что фаза не должна меняться более чем на половину периода в соседних пикселях. По этой причине развертка затруднена в областях больших деформаций, в частности около выхода на поверхность сейсмического разрыва, где смещения могут составить метры и более. В таких областях метод дифференциальной интерферометрии, в котором анализируется только фазовая компонента радиолокационного изображения, не всегда приводит к успешному результату. Более эффективным в таких случаях оказывается метод офсетов.

Метод офсетов основан на кросс-корреляции амплитуд двух изображений. После идентификации одних и тех же объектов на двух снимках, сдвиг между ними может быть измерен в пределах пикселя и разложен на составляющие по двум направлениям радарной системы координат: перпендикулярно (дальность) и параллельно (азимут) траектории движения спутника. У каждого из рассмотренных методов (фазового и амплитудного) есть преимущества и недостатки. Прежде всего, это точность измерений. Точность смещений по DInSAR зависит от значения когерентности и длины волны радиолокатора. Даже при условно низкой когерентности $\gamma = 0.2$ и длине волны $\lambda = 56$ мм (Sentinel-1) точность определения полей смещений оценивается в доли см [Feret, 2014]. Точность оценки смещений методом офсетов зависит от размера пикселя (или размера окна) при расчете кросс-корреляции по амплитудам двух изображений, и отношения “сигнал/шум”. Согласно работе [Strozzi, 2002], точность оценки смещений по наклонной дальности и азимуту составляют порядка $1/20$ пикселя. В то же время метод офсетов не требует выполнения трудоемкой и неоднозначной процедуры развертки фазы, он меньше подвержен влиянию атмосферных возмущений, чем метод DInSAR, и фиксирует значительные смещения (до нескольких метров), которые произошли в интервал времени между радарными снимками. Именно такие мас-

штабы деформаций можно было наблюдать на сегментах ВАЗР во время землетрясений в Турции.

РЕЗУЛЬТАТЫ ОЦЕНКИ СМЕЩЕНИЙ МЕТОДАМИ РСА-ИНТЕРФЕРОМЕТРИИ

Для оценки полей смещений были использованы снимки спутника Сентинель-1А с нисходящей 21-й орбиты и с восходящей 14-й орбиты. Границы снимков показаны на рис. 1. Поля сейсмических смещений были рассчитаны по интерферограмме, полученной по двум снимкам с нисходящей орбиты от 29.01.2023 г. и 10.02.2023 г. методом DInSAR, а постсейсмические смещения рассчитаны по снимкам от 10.02.2023 г. и 22.02.2023 г. Интерферограмма очень чувствительна к расчлененному рельефу и к большим деформациям, поэтому в областях метровых смещений, в приразломной зоне, возникли области декорреляции снимков, где процесс развертки из-за низкой когерентности не мог быть выполнен, или были отмечены ошибки фазовой развертки. Результаты будут показаны ниже.

По парным интерферограммам смещения определяются в направлении на спутник (U_{los}) и включают вертикальную и горизонтальную компоненты вектора смещений. По данным AFAD на ВАЗР в период землетрясений преимущественно произошли сдвиговые смещения. В таких случаях эффективным является также метод офсетов. Рассмотрим результаты, полученные этими методами. На приведенных ниже картах положительными считаются смещения в направлении на восток, север и к спутнику.

СМЕЩЕНИЯ, ПОЛУЧЕННЫЕ МЕТОДОМ ОФСЕТОВ

По двум снимкам нисходящей орбиты (29.01.2023 г. и 10.02.2023 г.), методом офсетов получены карты смещений в направлениях дальности и азимута (рис. 2а, 2б).

Если модуль вектора горизонтальных смещений в некоторой точке земной поверхности равен U_s , то смещения вдоль орбиты (по азимуту) — U_{Az} и по дальности — U_R будут равны:

$$\begin{aligned} U_{Az} &= U_s \cos(\beta - \alpha_h), \\ U_R &= U_s \sin(\beta - \alpha_h), \end{aligned} \quad (1)$$

где β — азимут вектора смещений U_s ; α_h — азимут орбиты (углы отсчитываются от направления на север по часовой стрелке). При вычислении по формулам (1) положительными будут смещения по направлению азимута орбиты и от спутника, поэтому для восходящей орбиты смещения U_{Az} и U_R будут положительными, если отражающий объект сместился в северном и/или восточном

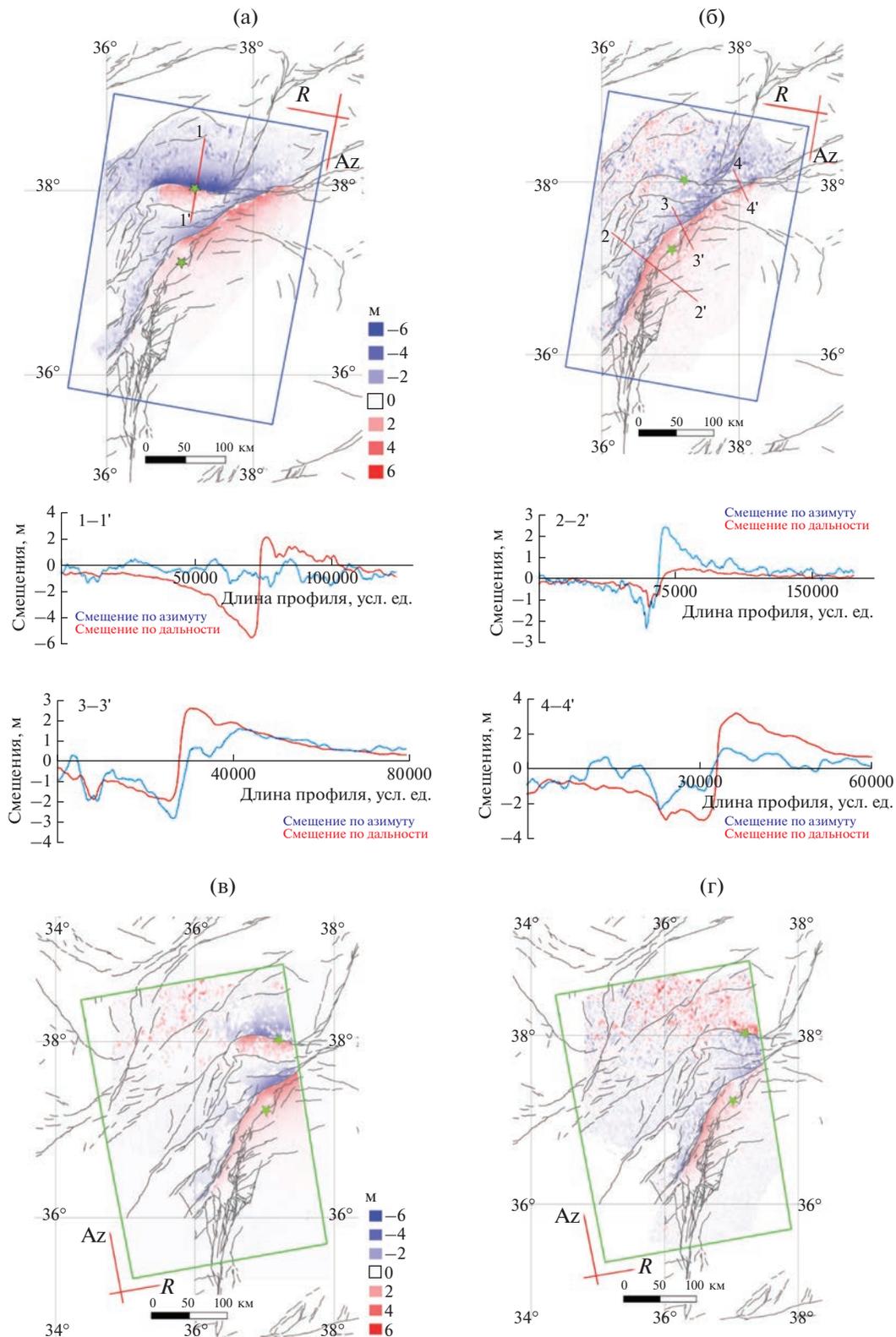


Рис. 2. Смещения земной поверхности (м), определенные методом офсетов. Вверху – по снимкам с нисходящей орбиты в направлении дальности (а) и азимута (б). Также показаны смещения по дальности (красный цвет) и азимуту (синий цвет) в метрах вдоль профилей, обозначенных линиями на карте (б). Внизу – смещения по снимкам с восходящей орбиты, также в направлении дальности (в) и азимута (г). Az – направление вдоль орбиты, R – перпендикулярно орбите.

направлении. Для нисходящей орбиты такие смещения будут отрицательными. Для удобства сравнения результатов, полученных с различных орбит, знак смещений на рис. 2 изменен так, чтобы все смещения были положительны на север и восток. Для этого смещения по азимуту и дальности, полученные с нисходящей орбиты, взяты с обратным знаком.

Очевидно, что горизонтальные смещения будут наиболее четко проявляться там, где векторы смещений и направление измерений (азимут или дальность) коллинеарны. Так, на разломе Сюргу—Чардак, в эпицентральной зоне землетрясения с M_w 7.5, смещения по дальности фиксируются очень четко (рис. 2а), в то время как в этой же области, смещения, измеренные по азимуту, не превышают уровня шумов (рис. 2б). На профиле 1-1' видно, что максимальная амплитуда смещений по дальности на разломе Сюргу—Чардак превосходит 7 м.

На южном отрезке ВАЗР от г. Тюркоглу до г. Антакья смещения по дальности существенно меньше реальных смещений, особенно в зоне рифта Карасу. Поскольку направление простирания разломов в этой области близко к траектории нисходящей орбиты (максимальный угол, который образует Восточно-Хатайский разлом с орбитой, не превышает 6°), то в этой области смещения в азимутальном направлении, показанные на рис. 2б, наиболее соответствуют реальным. В районе профиля 2-2' амплитуда смещений, полученных по азимуту, превышает 4 метра, а по дальности она как минимум в два раза меньше (рис. 2б).

Смещения на центральном сегменте ВАЗР, от г. Тюркоглу до г. Челикхан, более четко проявляются в направлении дальности. Максимальные амплитуды, измеренные по дальности, на этом сегменте возрастают от 4.5 до 6 метров при движении вдоль разлома на северо-восток к г. Челикхан (профили 3 и 4 на рис. 2б). Поле смещений по азимуту в этой области имеет малое отношение сигнал/шум.

Также методом офсетов были получены смещения в направлении дальности и азимута по двум снимкам с восходящей орбиты за период 28.01.2023 г.—09.02.2023 г. (рис. 2в, 2г). Геометрия съемки для восходящей орбиты хуже соответствует простиранию разломов, поэтому поля смещений по дальности (рис. 2в) и азимуту (рис. 2г) не так четко проявляются при съемке с этой орбиты. Наиболее четко смещения по дальности проявились только на центральном сегменте ВАЗР (рис. 2в). Смещения в этой области хорошо совпадают со смещениями по дальности с нисходящей орбиты. На рис. 2г полезный сигнал близок к уровню шума.

Зная смещения по азимуту и дальности, можно по формулам (1) рассчитать модуль вектора го-

ризонтальных смещений и его направление (рис. 3). Эти величины уже не зависят от геометрии съемки. Из рис. 3 следует, что смещениям более 1 метра подверглась значительная часть Восточной Турции. Максимальные сдвиговые смещения произошли на разломе Сюргу—Чардак и на центральном и северном участках ВАЗР. Здесь смещения превосходили 5 м. Стрелки показывают направление и амплитуду всех смещений, включая произошедшие в период съемки оползни и обвалы. В целом, стрелки четко показывают сдвиговые смещения в противоположных направлениях на бортах разломов.

ПОЛЯ СМЕЩЕНИЙ, ПОЛУЧЕННЫЕ МЕТОДОМ DInSAR

Поля смещений в направлении на спутник U_{los} , полученные методом DInSAR, можно разложить на вертикальную и горизонтальную компоненты:

$$U_{los} = U_{up} \cos(\theta) - U_R \sin(\theta), \quad (2)$$

где: θ — угол отклонения от вертикали направления распространения радарного сигнала; U_{up} — амплитуда вертикальных смещений; U_R — горизонтальные смещения в направлении дальности, рассчитанные по формуле (1). Поскольку исследуемые землетрясения в основном привели к горизонтальным смещениям, то, полагая вертикальную компоненту равной нулю, получим оценку сдвиговых смещений по дальности:

$$U_R \approx -U_{los} / \sin(\theta). \quad (3)$$

Угол отклонения направления распространения радарного сигнала от вертикали θ в период съемки территории, покрываемой снимками с нисходящей орбиты от 29.01.2023 г. и 10.02.2023 г., менялся от 30° до 46° , от правой границы снимка к левой. Поскольку этот угол известен для каждой отражающей площадки, смещения U_{los} можно пересчитать в смещения по дальности и сопоставить их с результатами, полученными методом офсетов (рис. 4). Эти смещения хорошо совпадают, за исключением приразломных зон, поскольку в этих областях развертка фазы может не выполняться или дать сглаженные значения. Наибольшие различия получены на профиле 2-2', проходящем через долину Гельбаши [Westaway, Arger, 1996]. Здесь область положительных смещений в направлении на спутник располагается по обе стороны от ВАЗР (рис. 4), в то время как на картах смещений по дальности (рис. 2) смещения при пересечении ВАЗР меняют знак. Расхождения могут быть связаны с ошибками развертки фазы, поскольку в долине располагаются два крупных водоема, поверхность которых имеет близкую к нулю когерентность. Часть имеющих-

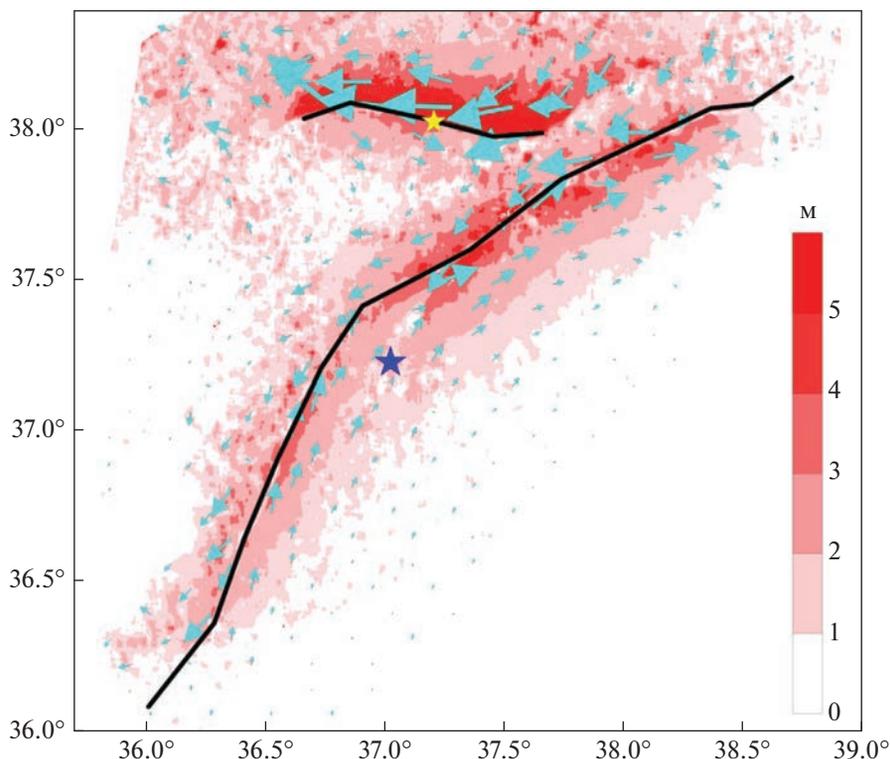


Рис. 3. Амплитуда векторов смещений земной поверхности (цветовая шкала) и направления смещений (стрелки). Максимальная стрелка соответствует смещению в 5.22 м. Черная линия проведена вдоль поверхности разрыва. Синяя и желтая звезды — эпицентры главных землетрясений.

ся расхождений может быть связана с наличием вертикальной составляющей в смещениях, которыми мы в формуле (2) пренебрегли.

Постсейсмические смещения, рассчитанные методом DInSAR, по двум снимкам с нисходящей орбиты от 10.02.2023 г. и 22.02.2023 г. показали, что значительных смещений на разломах в этот период больше не наблюдалось, за исключением области района Антакья, где 20.02.2023 г. произошло землетрясение магнитудой 6.3 с эпицентром в точке с координатами 36.154 N, 36.037 E (USGS). На рис. 5 эпицентр отмечен красной звездой. Максимальные смещения в направлении LOS, от спутника, составили -16 см (профиль 2). Эпицентр находится в юго-западной части области смещений от спутника (“оседаний”). По геометрии поля смещений можно заключить, что смещения произошли вдоль нодальной плоскости с простиранием 225° и падением 53° (данные USGS). Угол подвижки по сейсмологическим данным равен -27° , что соответствует левостороннему сдвигу со сбросовой компонентой.

В области, где разлом Сюргу–Чардак подходит к центральному сегменту ВАЗР, получены смещения амплитудой до 10 см. Смещения во время землетрясения здесь были небольшие. Возмож-

но, что на постсейсмическом этапе разлом немного продвинулся на восток.

МОДЕЛИРОВАНИЕ ПОВЕРХНОСТИ СЕЙСМИЧЕСКОГО РАЗРЫВА

Итак, по спутниковым снимкам получен набор данных о смещениях на ВАЗР: поля смещений по направлениям азимута и дальности с нисходящей и восходящей орбиты, поле смещений в направлении на спутник U_{los} . В целом эти поля хорошо согласуются. Поле U_{los} восстанавливается с ошибкой там, где амплитуда смещений достигала нескольких метров из-за проблем с разверткой фазы. Смещения, полученные методом офсетов по снимкам с восходящей орбиты (рис. 2в, 2г), имеют меньшее отношение сигнал/шум, чем результаты, полученные с нисходящей орбиты (рис. 2а, 2б). Наличие набора различных данных позволило выбрать для построения модели данные с максимальным отношением сигнал/шум, а именно: для северной части области, выше 37.4° с.ш., использованы смещения по дальности, полученные методом офсетов с нисходящей орбиты. Южнее параллели 37.0° с.ш. использованы смещения по азимуту, также определенные с нисходящей орбиты.

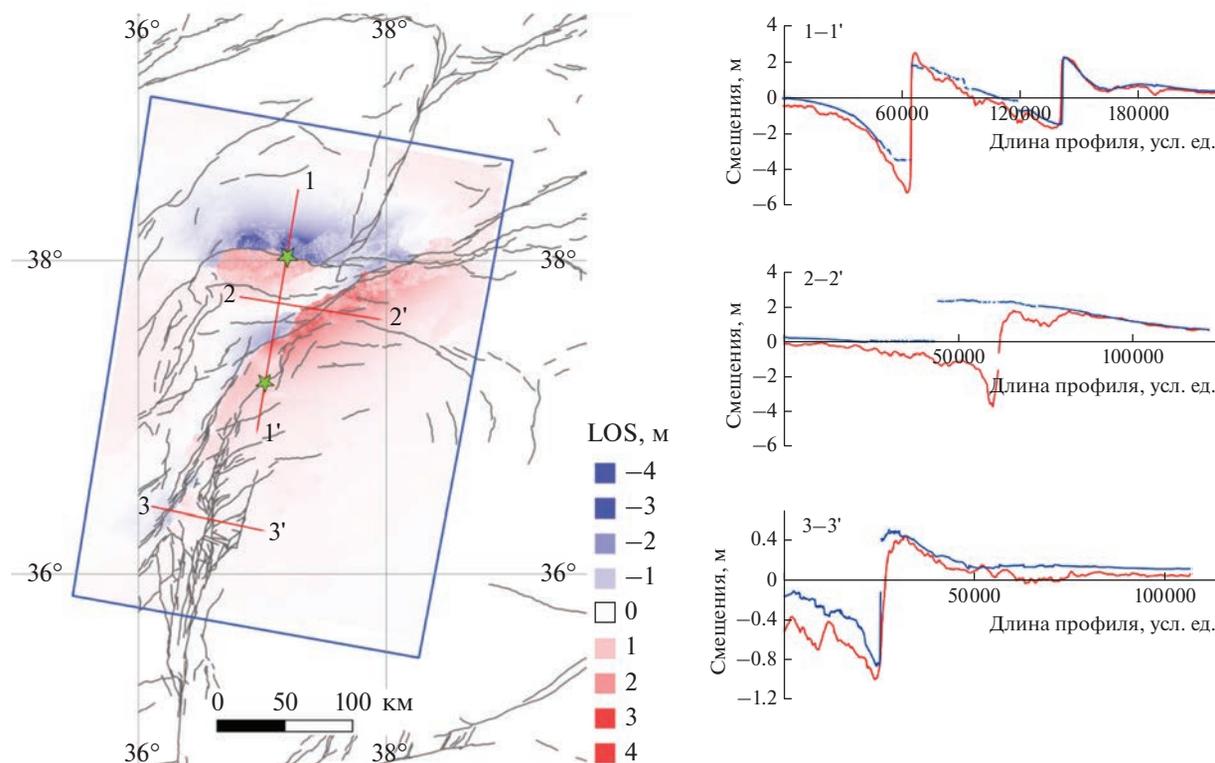


Рис. 4. Сравнение смещений (в метрах), рассчитанных по дальности методом офсетов и смещений, полученным по парной интерферограмме методом DInSAR и пересчитанных в смещения по дальности по формуле (3). На профилях справа, вдоль линий, показанных красным на карте: синий цвет – смещения U_R , рассчитанные по U_{los} ; красный цвет – смещения по дальности, рассчитанные по методу офсетов.

Используя базу разломов [Бачманов и др., 2017] и линию, которая разграничивает смещения в противоположных направлениях на карте офсетов, была задана трасса сейсмического разлома на дневной поверхности (черная линия на рис. 3). Далее эта линия была аппроксимирована отрезками прямых, которые являлись верхней границей прямоугольных площадок, аппроксимирующих сейсмический разрыв. Трасса разлома Сюргу–Чардак была разделена на 4 элемента по простиранию, а ВАЗР – на 15 элементов (рис. 6), из них 7 элементов вдоль его южного сегмента, а 8 элементов на центральном и северном сегментах. На разломе Сюргу–Чардак разрыв был задан от глубины 0.5 до 20 км с падением на север под углом 80° ; на ВАЗР глубина верхней кромки задана равной 1 км, нижней – 20 км (как и в работе [Varbot et al., 2023]), падение в северо-западном направлении под углом 85° согласно работам [Basili et al., 2013, Бачманов и др., 2017]. Небольшой разрыв, с которого начались землетрясения, аппроксимирован одним прямоугольным элементом с глубиной верхней кромки 0.5 км, нижней кромки – 15 км и углом падения 85° на восток. Длина разрыва по простиранию, равная

15 км, определена по карте смещений (рис. 2), согласно которой разрыв не достиг ВАЗР.

По глубине модели главных разломов разбиты на три уровня одинаковой протяженности по падению. Решение найдено под регуляризирующим условием, что смещения близки к чистому сдвигу. Для решения использовано решение задачи о смещениях на поверхности сферически расчлененной планеты в результате сдвига по падению и простиранию на расположенной на заданной глубине прямоугольной площадке [Pollitz, 1996]. Методика решения поставленной задачи детально изложена в работе [Михайлов и др., 2010].

На приведенной на рис. 6 модели поверхности разрыва, стрелки указывают направления смещений на висячем крыле разлома. Для ВАЗР падение было задано на северо-запад под углом 85° . Результаты меняются слабо, если задать падение на юг с таким же углом, как это сделано в построенной по сейсмологическим данным модели USGS.

На южном сегменте ВАЗР смещения монотонно увеличиваются с юга на север. На самом южном элементе смещения в нижней части оценены в 2.0 м, а в верхней – менее 0.11 м. Именно здесь

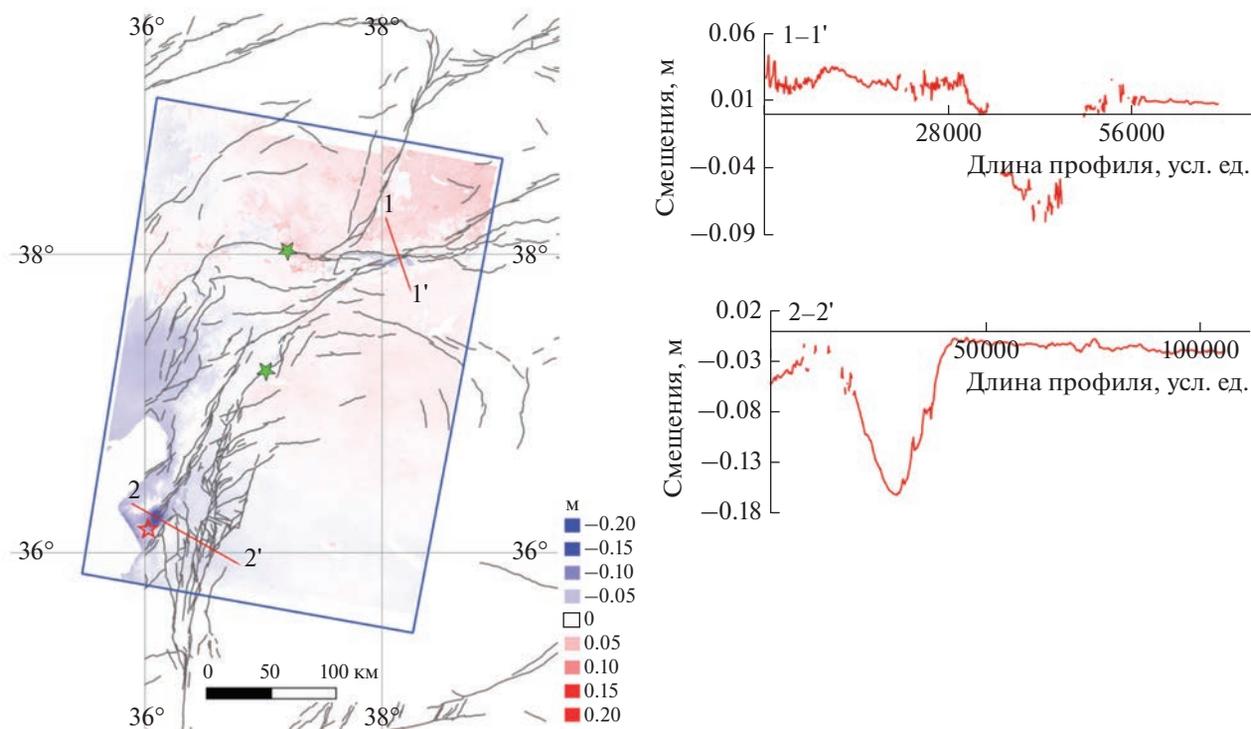


Рис. 5. Постсейсмические смещения (в метрах) на карте и вдоль профилей, показанных красными линиями, полученные методом DInSAR в направлении *LOS* по снимкам Сентинель-1А 10.02.2023 г. и 22.02.2023 г. Звездами обозначены эпицентры землетрясений: зеленые – 06.02.2023 г. (M_w 7.8, M_w 7.5), красная – 20.02.2023 г. (M_w 6.3).

20.02.2023 г. произойдет землетрясение магнитудой 6.3 (рис. 5), гипоцентр которого располагался на глубине 11.5 км, т.е. в верхней части среднего уровня модели.

Далее на север величина смещений в верхней части южного сегмента сейсмического разрыва увеличивается до 5.8 м, в средней части до 2.5 м, в нижней части не более 1.5 м.

На центральном сегменте ВАР, где его простирает поворачивает на С-СВ, величина смещений на сейсмическом разрыве существенно увеличивается. Смещения на отдельных элементах поверхности разрыва превосходят 10.2 м. На северном сегменте смещения убывают, но все же на нижнем уровне самого северного участка они составляют 3.4 м. Южное окончание модели сейсмического разрыва землетрясения Доганьол–Сиврис (Doğanuol–Sivrice) 24.01.2020 M_w 6.7, опубликованной на сайте USGS (красный прямоугольник на рис. 6), перекрывается с третьим с севера элементом нашей модели, где смещения на верхнем уровне составляют 6.8 м.

На трех восточных сегментах сейсмического разрыва вдоль разлома Сюрюг–Чардак произошли чисто сдвиговые смещения, а на западном его элементе добавляется и надвиговая компонента, там где разрыв поворачивает южнее (рис. 6). Сме-

щения в верхней части разрыва возрастают с востока на запад. На нижних уровнях разрыва более интенсивные смещения произошли в восточной части.

Смещения на небольшом разломе, на котором начались сейсмические события 06.02.2023 г., оценены в 2.1 м.

ОБСУЖДЕНИЕ РЕЗУЛЬТАТОВ И ВЫВОДЫ

На основе детального анализа спутниковых радарных снимков, были определены горизонтальные смещения вдоль разломов ВАР и Сюрюг–Чардак, а также небольшого разлома на продолжении Восточно-Хатайской зоны разломов, на котором началась серия катастрофических землетрясений. Наиболее четкие смещения получены методом офсетов по снимкам с нисходящей орбиты. Смещения на разломе Сюрюг–Чардак, а также на центральном сегменте, от г. Кахраманмараш (район эпицентра M_w 7.8) на северо-восток до г. Челикхан, и северном сегменте ВАР, наиболее детально определяются в направлении дальности (рис. 2а). Вдоль южного сегмента ВАР, простирающегося на юг–юго-запад от эпицентра главного события M_w 7.8 до побережья, более четко определяются смещения в направлении ази-мута (рис. 2б). Из имеющегося набора данных для

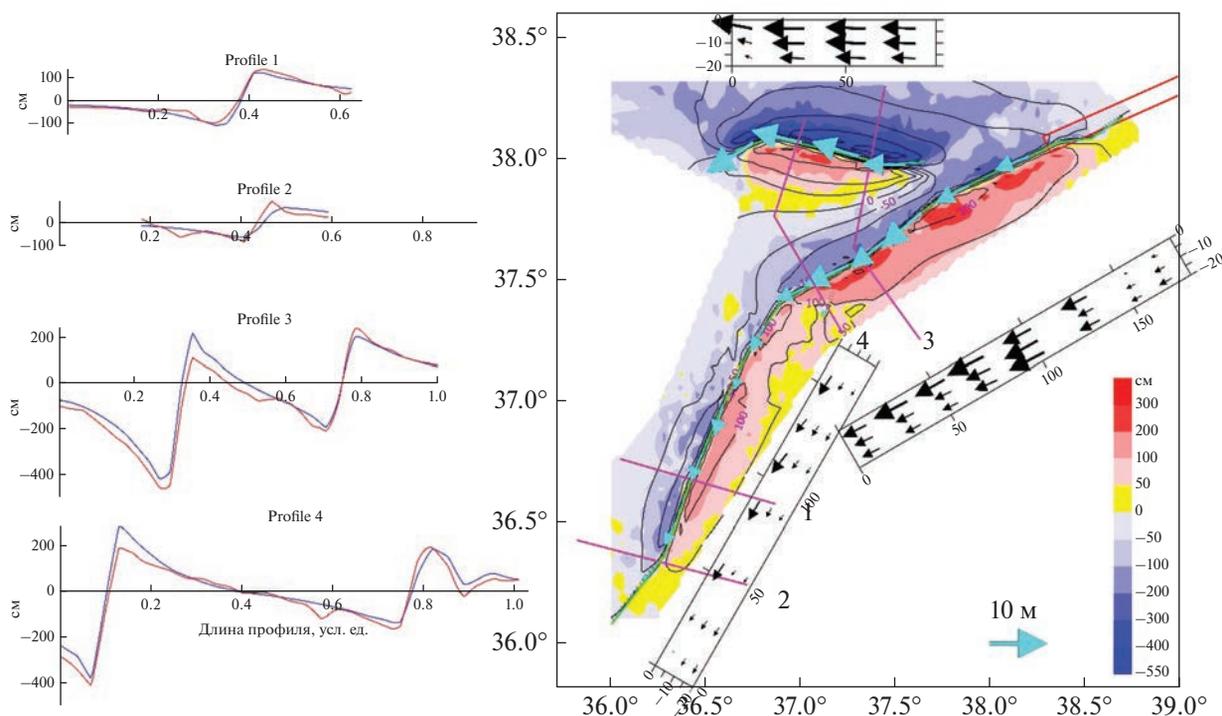


Рис. 6. Модель поверхности разрыва землетрясений 06.02.2023 г., построенная по данным РСА интерферометрии. Цветовая карта — смещения земной поверхности по дальности (в см), определенные методом офсетов по снимкам с нисходящего трека. Черные изолинии — те же смещения, рассчитанные по модели. Черные прямоугольники показывают поверхность разрыва в вертикальном разрезе, со смещениями на верхнем, среднем и нижнем уровне (черные стрелки). Голубые стрелки вдоль разломов показывают смещения на верхнем уровне модели в том же масштабе. Максимальная длина стрелки 9.3 м на верхнем уровне центрального сегмента ВАЗР. Бордовые линии — профили через область разрыва. Слева для этих профилей показаны РСА данные (красный цвет) и подбор по модели (синий цвет). Красный прямоугольник на СВ окончании ВАЗР показывает часть модели землетрясения 24.01.2020 г., построенной в USGS.

построения модели были выбраны данные с максимальным отношением сигнал/шум: для северной части области, выше 37.4° с.ш. — смещения по дальности, полученные методом офсетов с нисходящей орбиты, а южнее параллели 37.0° с.ш. — смещения по азимуту с той же нисходящей орбиты.

При построении модели использовано решение [Pollitz, 1996], построенное для сферически расслоенной модели Земли. В этой работе показано, что игнорирование сферической расслоенности планеты приводит к ошибкам до 20%, при этом наибольшие ошибки возникают при наличии большой сдвиговой компоненты. Также ошибку вносит и игнорирование сферичности при использовании решения в рамках идеализации упругого однородного полупространства [Okada, 1985], на основе которой построены модели USGS и в работе [Varbot et al., 2023].

Отличием нашей модели от модели USGS является более детальная геометрия поверхности сейсмического разрыва. Мы аппроксимировали разрыв 19 прямоугольными элементами по простиранию, поделенными на три уровня по паде-

нию. Согласно построенной нами модели сдвиговые смещения на центральном сегменте сейсмического разрыва вдоль ВАЗР достигают 10.2 м. На южном сегменте этого разрыва смещения существенно меньше. Следует подчеркнуть, что смещения земной поверхности зарегистрированы нами за период с 29.01.2023 г. по 10.02.2023 г., т.е. включают еще и постсейсмические смещения за 4 дня после основных сейсмических событий.

В нашей модели, как и в модели поверхности разрыва, опубликованной на сайте USGS и в [Varbot et al., 2023], на южном участке ВАЗР смещения возрастают с юга на север и в основном концентрируются в верхней части земной коры до глубины в 10 км. На южном окончании этой части разрыва, где 20.02.2023 г. произошло землетрясение магнитудой 6.3 с глубиной гипоцентра 11.5 км, на нижних уровнях нашей модели получены смещения до 2 м, а на верхнем уровне смещений почти нет (11 см).

Область наиболее интенсивных смещений на ВАЗР фиксируется на ее центральном сегменте. Смещения во всех моделях здесь уходят на глубину и в нашей модели достигают 10.2 м, что согла-

суется с работой [Barbot et al., 2023] и с моделью USGS (11 м).

Отметим, что северное окончание полученного нами разрыва на ВАЗР перекрывается с южным окончанием модели поверхности разрыва землетрясения Доганьол-Сиврис 24.01.2020 г. с M_w 6.7, приведенной на сайте USGS. Южное окончание модели USGS расположено в пределах третьего с севера элемента нашей модели, где смещения на нижнем уровне равны 5.3 м, на среднем — 3.3 м, на верхнем — 6.5 м. В модели [Barbot et al., 2023] в этой области смещения невелики, что позволило авторам сделать вывод о том, что здесь находится сейсмическая брешь и существует опасность нового землетрясения. Наши данные не подтверждают это заключение, поскольку именно на южном окончании поверхности разрыва землетрясения Доганьол-Сиврис 24.01.2020 г. величины смещений в нашей модели резко возрастают.

Во всех моделях существенные смещения на разломе Сюрюг—Чардак фиксируются до глубины в 20 км. В модели USGS амплитуда смещений превосходит 11 м, в нашей модели в верхней части самого западного элемента они равны 9.8 м, в модели [Barbot et al., 2023] смещения здесь немного меньше.

В целом наши результаты согласуются с работой [Barbot et al., 2023], за исключением наличия сейсмической бреши. Одной из причин расхождений в результатах может быть различие в методах решения. Мы используем регуляризирующее условие близости угла подвижки к заданному по решению механизма очага [Михайлов и др., 2019; Diament et al., 2020]. Другие авторы используют условие гладкости получаемого решения.

Полученные результаты еще раз демонстрируют эффективность применения спутниковой радарной интерферометрии при изучении геодинамических процессов.

ФИНАНСИРОВАНИЕ РАБОТЫ

Разработка методики расчетов и интерпретации смещений по дальности и азимуту с применением метода офсетов выполнено за счет гранта Российского научного фонда № 23-17-00064, <https://rscf.ru/project/23-17-00064/>.

БЛАГОДАРНОСТИ

Авторы благодарят Европейское космическое агентство за снимки спутника Сентинель-1А.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

Бачманов Д.М., Кожурин А.И., Трифионов В.Г. База данных активных разломов Евразии // Геодинамика и тектонофизика. 2017. Т. 8. № 4. С. 711–736.

Михайлов В.О., Назарян А.Н., Смирнов В.Б., Диаман М., Шапиро Н.М., 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 г. // Физика Земли. 2010. № 2. С. 3–16.

Михайлов В.О., Тимошкина Е.П., Киселева Е.А., Хайретдинов С.А., Дмитриев П.Н., Карташов И.М., Смирнов В.Б. Проблемы совместной интерпретации временных вариаций гравитационного поля с данными о смещениях земной поверхности и дна океана на примере землетрясения Тохоку-Оки (11 марта 2011 г) // Физика Земли. 2019. № 5. С. 56–60.
<https://doi.org/10.31857/S0002-33372019553-60>

Barbot S., Luo H., Wang T., Hamiel Y., Piatibratova O., Javed M.T., Braitenberg C., Gurbuz G. Slip distribution of the February 6, 2023 M_w 7.8 and M_w 7.6, Kahramanmaraş, Turkey earthquake sequence in the East Anatolian Fault Zone // Seismica. 2023. V. 2. № 3.
<https://doi.org/10.26443/seismica.v2i3.502>

Bayrak E., Yılmaz Ş., Softa M., Türker T., Bayrak Y. Earthquake hazard analysis for East Anatolian Fault Zone, Turkey // 2015. Natural Hazards. V. 76. № 2. P. 1063–1077.
<https://doi.org/10.1007/s11069-014-1541-5>

Basili R., Kastelic V., Petricca P., Tarabusi G., Tiberti M., Valensise G. The European Database of Seismogenic Faults (EDSF) compiled in the framework of the Project SHARE. 2013.
<https://doi.org/10.6092/INGV.IT-SHARE-EDSF>

Diament M., Mikhailov V., Timoshkina E. Joint inversion of GPS and high-resolution GRACE gravity data for the 2012. Wharton basin earthquakes // J. Geo-dynamics. 2020. V. 136.
<https://doi.org/10.1016/j.jog.2020.101722>

Duman T.Y., Emre Ö. (2013). The East Anatolian Fault: geometry, segmentation and jog characteristics // Geological Society. 2013. V. 372. № 1. P. 495–529.
<https://doi.org/10.1144/sp372.14>

Ergin M., Aktar M., Eyidoğan H. Present Day Seismicity and Seismotectonics of the Cilician Basin: Eastern Mediterranean Region of Turkey // Bulletin of the Seismological Society of America. 2004. V. 94. № 3. P. 930–939.

Ferretti A. Satellite InSAR Data Reservoir Monitoring from Space. 2014.

Hanssen R.F. Radar Interferometry: Data Interpretation and Error Analysis. Dordrecht: Kluwer Academic Publishers. 2001. 308 p.

Massonnet D., Souyris J.C. Imaging with synthetic aperture radar. EPFL press. 2008. 288 p.

Michel R., Avouac J.P., Taboury J. Measuring ground displacements from SAR amplitude images: Application to the Landers earthquake // Geophysical Research Letters. 1999. V. 26. № 7. P. 875–878.

McClusky S., Balassanian S., Barka A., Demir C., Ergintav S., Georgiev I., Gurkan O., Hamburger M., Hurst K., Kahle H., Kastens K. Global Positioning System constraints on plate kinematics and dynamics in the eastern Mediterranean and Caucasus // J. Geophys. Res. 2000. V.105. № B3. P. 5695–5719.

Milkereit C., Grosser H., Wang R., Wetzel H., Woith H., Karakisa S., Zünbül S., Zschau J. Implications of the 2003 Bingöl Earthquake for the Interaction between the North

and East Anatolian Faults // *Bulletin of the Seismological Society of America*. 2004. V. 94. P. 2400–2406.

Okada Y. Surface deformation due to shear and tensile faults in a half-space // *BSSA*. 1985. V. 75. № 4. P. 1135–1154.

Özmen Ö.T., Yamanaka H., Alkan M.A., Çeken U., Öztürk T., Sezen A. (2017). Microtremor Array Measurements for Shallow S-Wave Profiles at Strong-Motion Stations in Hatay and Kahramanmaraş Provinces, Southern Turkey // *Bulletin of the Seismological Society of America*. 2017. V. 107. № 1. P. 445–455.

Pollitz F.F. Coseismic deformation from earthquake faulting on a layered spherical Earth // *Geophysical J. International*. 1996. V. 125. № 1. P. 1–14.

Reilinger R., McClusky S., Vernant P., Lawrence S., Ergintav S., Cakmak R., Ozener H., Kadirov F., Guliev I., Stepanyan R., Nadariya M. GPS constraints on continental deformation

in the Africa–Arabia–Eurasia continental collision zone and implications for the dynamics of plate interactions // *J. Geophys. Res.* 2006. V. 111. № B05411. P. 1–26.

Strozzi T., Luckman A., Murray T., Wegmuller U., Werner C.L. Glacier motion estimation using SAR offset-tracking procedures // *IEEE Transactions on Geoscience and Remote Sensing*. 2002. V. 40. № 11. P. 2384–2391. <https://doi.org/10.1109/tgrs.2002.805079>

Westaway R.O.B., Arger J.A.N. The Gölbaşı basin, south-eastern Turkey: a complex discontinuity in a major strike-slip fault zone // *J. Geological Society*. 1996. V.153. № 5. P. 729–744.

Xu J., Liu C., Xiong X. Source Process of the 24 January 2020 M_w 6.7 East Anatolian Fault Zone, Turkey, Earthquake // *Seismol. Res. Lett.* 2020. V. 91. P. 3120–3128. <https://doi.org/10.1785/0220200124>

Reconstruction of Co-Seismic and Post-Seismic Processes for the February 6, 2023 Earthquake in Turkey from Data of Satellite SAR Interferometry

V. O. Mikhailov^a, I. P. Babayants^b, M. S. Volkova^{a,*}, E. P. Timoshkina^a, V. B. Smirnov^{a,b}, and S. A. Tikhotsky^a

^a*Schmidt Institute of Physics of the Earth, Russian Academy of Sciences, Moscow, 123995 Russia*

^b*Faculty of Physics, Moscow State University, Moscow, 119991 Russia*

*e-mail: msvolkova6177@gmail.com

Abstract—Using different methods for processing SAR images from the Sentinel-1A satellite, the displacement fields were determined in the region of the East Anatolian Fault Zone (EAFZ) and the Sürgü-Çardak faults, as well as a small fault on the continuation of the East Hatay fault zone, which rupture initiated a series of catastrophic earthquakes in Turkey on February 06, 2023. DInSAR and offset methods were applied. The most detailed data on the displacements were obtained by the offset method using images from the descending orbit. When constructing the model from the available SAR data, the data with the maximum signal-to-noise ratio were selected. For the northern part of the region, above 37.4° N, the range displacements obtained by the offset method from a descending orbit were used. South of parallel 37.0° N, we used azimuth displacements from the same descending orbit. The model of the seismic rupture was constructed on the basis of solution of (Pollitz, 1996) of the problem of deformations at the surface of a layered spherical Earth caused by along dip and strike displacements on a rectangular cut located inside the planet. Pollitz (1996) demonstrated that ignoring the spherical layering of the planet leads to errors up to 20%, with the largest errors occurring in the presence of a large strike-slip component. Ignoring sphericity also introduces an error when using the solution in the framework of the idealization of an elastic homogeneous half-space with a flat free boundary (Okada, 1985) which was used when constructing USGS and (Barbot et al., 2023) models. In our model the surfaces of seismic rupture are approximated by 19 rectangular elements along the strike, divided into three levels along the dip. Another element approximated a rupture along the extension of the East Hatay Fault Zone. As in the models of other authors (USGS; Barbot et al., 2023), in our model in the southern part of the EAFZ, the displacements increase from south to north, and are mainly concentrated in the upper part of the Earth's crust to a depth of 10 km. At the southern end of this rupture, displacements in our model with an amplitude of up to 2 m are obtained at the lower levels of the model, and at its upper level, the displacements were only 0.11 m, and in this area on February 20, 2023 an earthquake of magnitude 6.3 occurred with a hypocentre depth of 11.5 km. The main displacements on the EAFZ are determined on its central segment. Here, the displacements go to a greater depth, their value reaches 10.2 m. On the Sürgü-Çardak fault, significant displacements occurred down to a depth of 20 km; displacements exceeded 9.8 m. In our model, at the northeast end of the seismic rupture along the EAFZ, a displacement area of 6.8 m overlaps with the southwest end of the seismic rupture model of the Doğanoyol-Sivrice earthquake of January 24, 2020 with M_w 6.7, published on the USGS website. Therefore, our model does not confirm the hypothesis of the presence of a seismic gap here, which, according to (Barbot et al., 2023), is a zone of a possible nearest earthquake.

Keywords: earthquake, Turkey, February 6, 2023, East Anatolian Fault Zone, SAR interferometry, offsets, rupture surface model, post-seismic displacements