

К ВОПРОСУ ОБ ИЗЛУЧЕНИИ СЕЙСМИЧЕСКИХ КОЛЕБАНИЙ ПРИ СДВИГЕ ПО ПОВЕРХНОСТИ РАЗЛОМА

А.М. Будков, Г.Г. Кочарян

ИДГ РАН

Приводятся некоторые результаты 2D численного моделирования процесса излучения колебаний при сдвиге по гетерогенной поверхности, содержащей участки с разным характером фрикционного взаимодействия. Показано, что высокочастотная часть спектра излучения определяется характеристиками пятен со свойствами скоростного разупрочнения – «asperities», на одном из которых всегда наблюдается старт разрыва. Низкочастотная часть спектра, а, следовательно, и такие параметры, как сейсмический момент и магнитуда на большом расстоянии, определяются характеристиками области разлома, вовлеченной в движение. Остановка разрыва происходит в области, обладающей свойством скоростного упрочнения, обусловленного либо локальным снижением уровня напряжений, нормальных к плоскости разлома, либо свойствами геоматериала, слагающего участок разлома.

DOI: 10.26006/IDG.2018.10.20181

Введение

В ранних моделях очага землетрясения явно или неявно предполагался в среднем равномерный сброс напряжений и равномерное выделение запасенной упругой энергии в окрестности всей поверхности разрыва. В самом деле, угловая частота спектра колебаний на больших расстояниях примерно соответствуют величине $\omega \cong C_s/L$, где C_s – скорость распространения поперечных волн, а L – характерный размер разрыва. В тоже время, попытка описания спектра колебаний в ближней зоне землетрясения наталкивается на необходимость введения предположения о гетерогенности поверхности скольжения.

В 70–80-е годы прошлого века был предложен подход, согласно которому поверхность скольжения не однородна, а содержит особые участки. Терминология для описания гетерогенности плоскости разлома стала общеупотребимой и названия «неровности» (asperities) и «барьеры» (barriers) часто используются в литературе. Изначально предполагалось, что и «asperities» [Kanamori, Stewart, 1978], и «барьеры» [Aki et al., 1977] представляют собой некоторые «сильные пятна», которые, однако, играют разную роль в распространении разрыва землетрясения.

Барьеры, по мнению авторов [Aki et al., 1977], представляют собой области на поверхности разлома «недоразрушенные» в процессе распространения разрыва землетрясения. Наличием таких областей в данной модели объясняется, в частности, возникновение афтершоков.

Asperities в первоначальной модели [Kanamori, Stewart, 1978] представляют собой «прочные, напряженные» пятна, окруженные областями, где напряжение частично сбрасывается в межсейсмический период форшоками и событиями

медленного скольжения. В окрестности этих пятен величина косейсмического смещения максимальна, а коэффициент сейсмической эффективности близок к единице

$$\chi = \frac{\dot{P}_s}{v_p S_f} \approx 1. \quad (1)$$

В выражении (1) $P_s = \frac{M_0}{G} = \int_S u dS$, M_0 – сейсмический момент, G – модуль сдвига, u – вектор косейсмического смещения, S_f – площадь разрыва, v_p – скорость смещения плиты под действием тектонических сил.

В соответствии с моделью «asperities» величина землетрясения зависит от возможности нескольких этих областей разрушиться в течение одного события. Хотя термин «asperities» интуитивно подводит к понятию повышенной прочности, концепция сильных и слабых «пятен» не была достаточно обоснована ни с позиций структуры, ни физически.

В последние годы появляется все больше аргументов в пользу того, что «asperities» являются областями с выраженным свойством скоростного разупрочнения в рамках модели Rate & State трения, в то время как барьеры представляют собой области со скоростным упрочнением [Scholz, 1998; Sholz, Campos, 2012; Кочарян, 2016; Corbi et al., 2017]. В рамках этого подхода старт разрыва может происходить только внутри нестабильных площадей, где имеет место классическое прерывистое скольжение с коэффициентом сейсмической эффективности $\chi = 1$. В окружающей области скольжение условно стабильно (скольжение стабильно при квазистатической нагрузке, но может стать нестабильным при динамической нагрузке выше определенной величины), а коэффициент сейсмической эффективности $0 < \chi < 1$. Существуют разные мнения относительно того, какой параметр отвечает за разницу во фрикционном поведении этих областей – уровень напряжений или свойства материала.

С точки зрения механики очага землетрясения представляет большой интерес вопрос о вкладе различных участков разлома и окружающего массива в излучение сейсмических колебаний. В настоящей работе приведены результаты численного моделирования этапа излучения сейсмических волн при сдвиге разлома с гетерогенной поверхностью.

Постановка расчетов и полученные результаты

Осуществлялось численное моделирование процесса сдвигового деформирования шероховатых контактов скальных поверхностей. Для проведения численных расчетов использовался двумерный программный комплекс [Архипов и др., 2003], разработанный на основе лагранжева численного метода «Тензор». Расчеты выполнены в плоской постановке.

В серии расчетов рассматривалась система из двух упругих блоков (плотность $\rho = 2,5 \text{ г/см}^3$, скорость продольных волн $C_p = 3000 \text{ м/с}$, модуль сдвига $G = 52 \text{ МПа}$), разделенных поверхностью скольжения. При задании граничного условия в середине плоскости скольжения выделялось пятно «asperity» протяженностью 10 м, трение в котором описывалось с помощью Rate & State закона. Согласно известным соотношениям этой эмпирической модели [Dieterich, 1979], коэффициент трения μ зависит от текущей скорости скольжения V и от переменной состояния θ :

$$\mu = \mu_0 - a \ln \left(\frac{V_0}{V} + 1 \right) + b \ln \left(\frac{V_0 \theta}{D_c} + 1 \right). \quad (2)$$

Здесь μ_0 – константа, соответствующая стабильному скольжению, a, b, D_c, V_0 – эмпирические константы, V – текущая скорость смещения.

При $(a - b) > 0$ реализуется режим скоростного упрочнения, то есть скольжение остается стабильным. Условие $(a - b) < 0$ приводит к скоростному разупрочнению и обеспечивает условия для возникновения прерывистого скольжения.

От традиционной модели Rate & State используемый закон трения отличался тем обстоятельством, что после срыва трение на пятне описывается тем же законом Кулона, что и на остальной части контакта:

$$\mu = \mu_0. \quad (3)$$

Это было сделано для того, чтобы избежать повторных динамических срывов при прохождении волн отраженных от краев блока. Используемые в основной серии расчетов коэффициенты модели обеспечивали режим скоростного разупрочнения: $\mu_0 = 0.3$, $a = 0.0002$, $b = 0.0882$, $D_c = 1$ мкм, $V_0 = 0.002$ м/с. Размеры верхнего подвижного блока (высота, длина) 50×100 м. Нижний блок размером 400×800 м неподвижен: с трех сторон зажат абсолютно жесткими стенками.

Расчет проводился в три этапа. На первом этапе верхний блок (блок 1) прижимается к нижнему блоку (блок 2) силой нормального давления так, чтобы обеспечить требуемое среднее значение вертикальной компоненты тензора напряжений. На втором этапе расчета (предварительный сдвиг с целью сокращения времени счета) производится горизонтальная протяжка верхней грани блока 1 со скоростью ~ 1 см/с до возникновения скольжения на всей нижней грани блока. После этого протяжка останавливается и, с помощью искусственных вязкостей, гасятся все колебательные процессы в системе. На третьем этапе расчета осуществляется равномерная горизонтальная протяжка блока 1 за верхнюю грань со скоростью $v_p = 1$ мм/с. Выбор величины скорости протяжки обусловлен целесообразностью сокращения расчетного времени, хотя при интерпретации результатов расчета следует иметь в виду, что отношение v_p/C_p велико по сравнению с натурным значением.

В расчетах контролировались кинематические параметры движения и компоненты тензора напряжений. Кроме того, для визуализации области выделения упругой энергии рассчитывалось пространственное распределение изменения плотности энергии сдвиговой деформации блоков в различные моменты времени относительно начала срыва.

На рис. 1 приведен пример расчета зависимости от времени кинетической энергии E_{kin} блоков 1 и 2, а также пространственного распределения разности величин плотности энергии сдвигового деформирования ΔE_s в начале срыва и в момент достижения максимума величины кинетической энергии. Энергия нормирована на кинетическую энергию E_0 верхнего блока, движущегося со скоростью протяжки v_p . Величина ΔE_s показывает, за счет разгрузки каких областей массива потенциальная энергия деформирования переходит в кинетическую (излученную). Можно видеть, что максимальная плотность энергии достигается в окрестности пятна скоростного разупрочнения («asperity»).

Картины излучения в обоих блоках довольно близки так, что в дальнейшем мы будем рассматривать параметры движения только верхнего блока. Более того,

специально проведенные расчеты, в которых нижний блок считался абсолютно жестким, показали, что волновые процессы, происходящие в нижнем блоке, слабо влияют на параметры движения верхнего блока. Это позволяет существенно упростить задачу, рассматривая скольжение верхнего блока по абсолютно жесткой поверхности. В такой постановке выполнена серия расчетов, в которой моделировалась протяжка блоков различного размера. Следует отметить, что положение пятна «asperity», а также соотношение размера пятна и длины блока имеет важное значение, вследствие существенно неравномерного распределения нормальных напряжений σ_n в основании скользящего блока (рис. 2, а). Особенности в углах связаны с конечностью размеров блоков.

Размером верхнего блока обусловлена и неравномерность распределения нормальных напряжений σ_n , выраженная на концах участка (рис. 2, а). На большей части контакта величина σ_n близка к постоянной величине, хотя

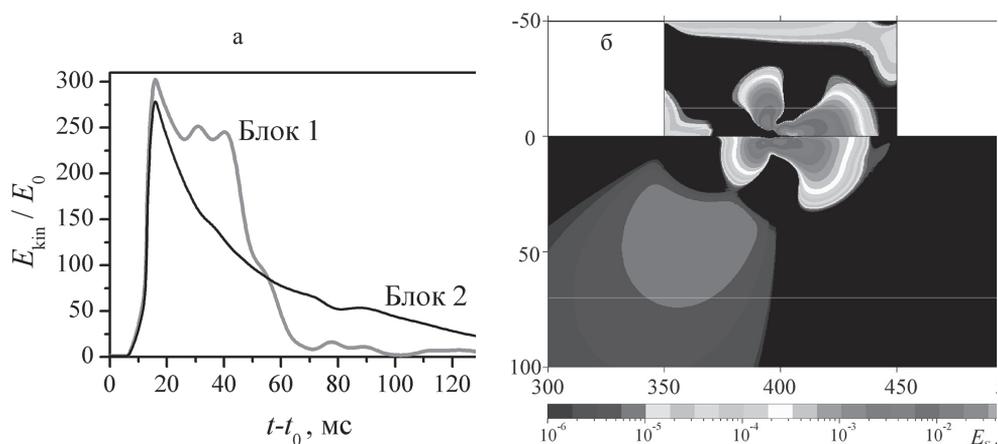


Рис. 1. Зависимости от времени кинетической энергии блоков в процессе срыва (а) и пространственное распределение разности величин плотности сдвиговой энергии в начале и в пике срыва (б)

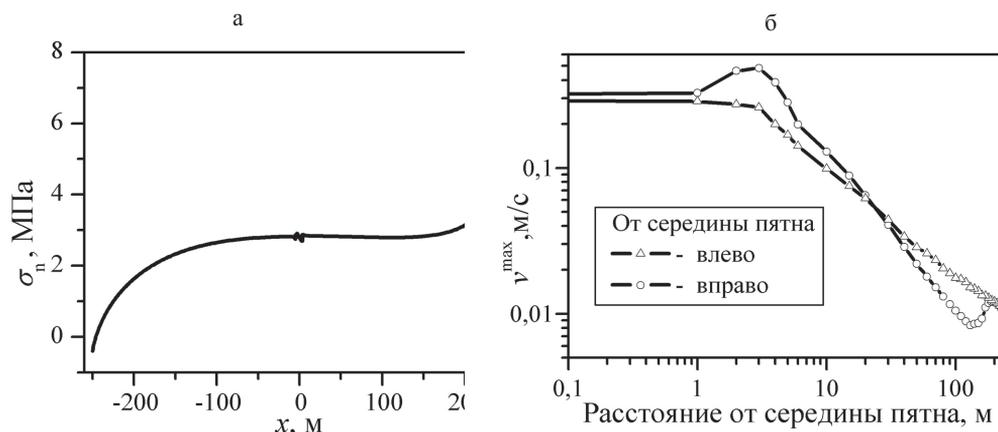


Рис. 2. Распределения нормальных напряжений в основании верхнего блока (а) и амплитуды скорости скольжения вдоль поверхности разрыва (б). Блок размером 250×500 м

небольшая вариация нормального напряжения на «asperity» определяет и анизотропию скорости скольжения. По мере удаления от «asperity» скорость скольжения снижается примерно пропорционально расстоянию (рис. 2, б). Длительность основной фазы движения довольно короткая и составляет величину порядка $t \cong 2l/C_p$, где l – размер пятна «asperity». Величина t более чем на порядок меньше периода, соответствующего угловой частоте спектра колебаний на больших расстояниях от очага $\omega \cong C_s/L$, где L – характерный размер разрыва. Это связано с тем, что излучение упругих волн формируется за счет двух источников – квазиповерхностного и объемного. Первый определяет излучение в высокочастотной области и параметры движения в окрестности разрыва. В то время как второй ответственен за излучение в низкочастотной части спектра и определяет параметры сейсмических колебаний на большом расстоянии от источника. В этом смысле ситуация аналогична наблюдаемой при камуфлетном взрыве, когда высокочастотная часть спектра определяется эпюрой напряжений на стенке развивающейся полости, а низкочастотная – величиной вытесненного объема.

На рис. 3, а приведено распределение смещений $\Delta u_x(x)$ по поверхности разрыва для разных моментов времени после окончания срыва, а на рис. 3, б – изменение во времени величины $\hat{M}_0 = \int_0^L \Delta u(x) dx$, пропорциональной полному реализованному «сейсмическому моменту». Пунктиром здесь же приведена величина $\hat{M}_T = v_p \cdot t \cdot L$, пропорциональная сейсмическому моменту, реализованному за счет «тектонических сил». После старта разрыва продолжительность косейсмической фазы реализации момента составляет около 500 мс, после чего происходит постепенное выравнивание величины относительного смещения берегов по длине блока, а скорость нарастания сейсмического момента снижается. Стартуя, разрыв развивается в соответствии с волновой скоростью распространения возмущения в сторону периферии блока, а мода скольжения блока как целого реализуется через значительное время, которое, вероятно, определяется распространением фронта медленного возмущения, представляющего собой суперпозицию колебаний, многократно отраженных от краев блока [Rubinstein et al., 2004]. Как видно из рис. 3,

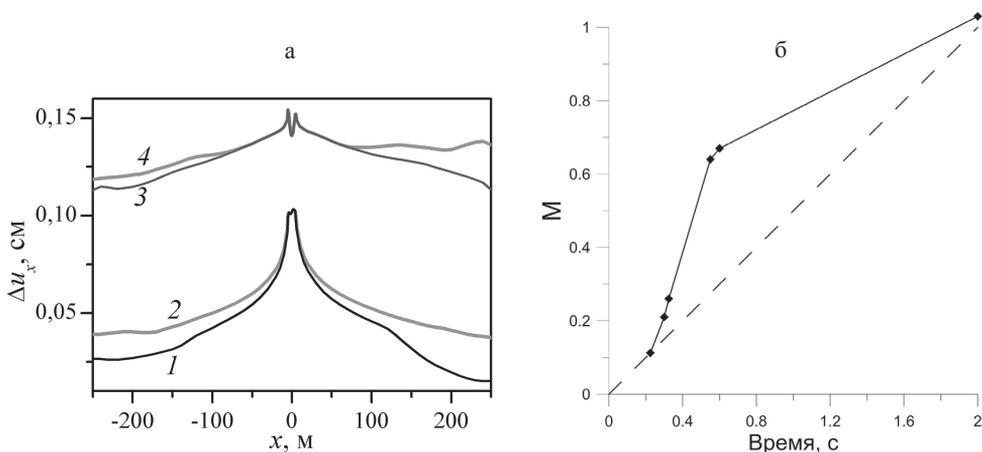


Рис. 3. Пространственное распределение приращения горизонтальной составляющей смещения на плоскости скольжения в различные моменты времени: 1 – 75, 2 – 100, 3 – 225, 4 – 375 мс после срыва (а) и зависимость приведенного сейсмического момента от времени (б)

коэффициент сейсмической эффективности χ на участке разлома в окрестности «asperities» в соответствии с (1) будет близок к единице, снижаясь к периферии разрыва. Заметим, что картина распределения параметра χ существенно смазана из-за высокого значения скорости протяжки. При низких значениях v_p этот эффект будет более выражен.

Если на поверхности контакта вне пятна трение определяется законом Кулона, то разрыв не останавливается, а скорость относительного смещения берегов постепенно затухает в соответствии с рис. 2, б. Существенно иная ситуация складывается в том случае, когда трение вне пятна «asperity» задается соотношением (2) с $(a - b) > 0$, то есть выполняется условие скоростного упрочнения. Наличие такого участка приводит к быстрой остановке разрыва (рис. 4).

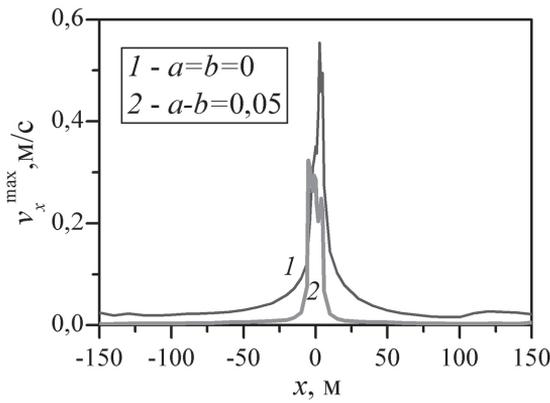


Рис. 4. Распределение максимальной скорости на границе скольжения в случае кулоновского трения за пределами пятна (1) и при наличии упрочнения (2)

Чтобы оценить отдельно вклад в сейсмический эффект срыва поверхностного источника (собственно, пятна «asperity») и объемного источника (подвергнутого сдвиговой деформации в результате протяжки блока) был выполнен расчет по упрощенной модели. Рассматривался ненапряженный блок ($v_0 = 0$), на участке основания которого задано граничное условие в виде распределения скоростей смещения относительно нижнего блока, соответствующее по своим амплитудным и временным параметрам расчету с «asperity».

В первом варианте расчета по упрощенной модели нормальные напряжения на контакте не задавались, то есть трение на границе отсутствовало. Это приводит к симметричному, в отличие от основного расчета (рис. 2, б), пространственному распределению амплитуды скорости (рис. 5). Сопоставление полученных данных рис. 5 с результатами полного расчета показывает, что в окрестности разрыва один поверхностный источник сдвига обеспечивает сейсмический сигнал по амплитуде близкий к полному варианту. Вероятно, подкачка энергии при распространении волны по напряженному блоку происходит, главным образом, в зафронтной области и приводит к увеличению длительности первой фазы и, соответственно, увеличению амплитуды смещений, что хорошо демонстрируют результаты численного моделирования протяжки блоков различного размера с одинаковыми параметрами «asperity» (рис. 6). Данные рис. 6 нормированы на кинетическую энергию блока размером 50×100 м, движущегося со скоростью протяжки.

Во втором варианте расчета по упрощенной модели нормальные напряжения формально задавались в соответствии с распределением на рис. 2, а и, соответственно, рассчитывалась сила трения. В этом варианте (линия 2 на рис. 5) разрыв

Рис. 5. Зависимость максимальной скорости движения от расстояния до середины основания блока вдоль плоскости скольжения. Расчет с модельным источником без учета (1) и с учетом трения (2)

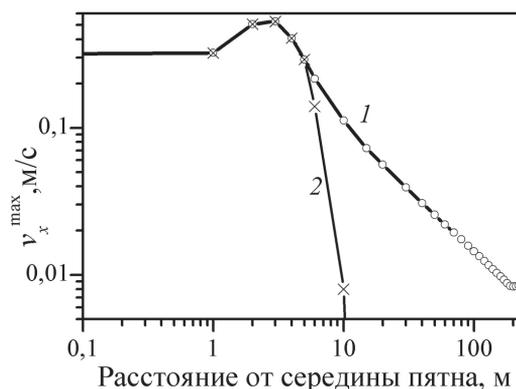
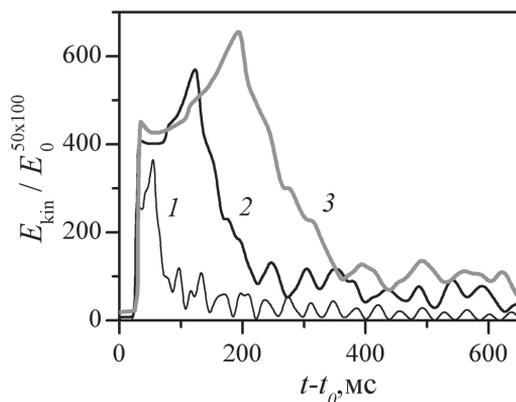


Рис. 6. Зависимости от времени кинетической энергии блоков разных размеров в процессе срыва: 1 — блок 50×100, 2 — блок 150×300, 3 — блок 250×500 м



остановился на расстоянии 5 м от края пятна. Это означает, что необходимым условием распространения разрыва является наличие напряжений, касательных к плоскости контакта, а сейсмический сигнал от срыва является лишь триггером. Более того, крип на стабильных участках контактной границы означает наличие баланса между напряжениями сдвига и силой трения. Именно поэтому в случае кулоновского трения закономерности распространения разрыва не зависят от величины коэффициента трения.

Если на плоскости контакта будут расположены несколько пятен «asperities» подготовленных к срыву, то из-за суперпозиции областей с высоким значением коэффициента сейсмической эффективности (участки «быстрого» выделения энергии) часть излученной энергии будет перераспределена в высокочастотную область, тогда как реализованный сейсмический момент, а, следовательно, и магнитуда события, определенная на большом расстоянии, будет определяться характерным размером блока, вовлеченного в движение.

В заключение обратим внимание, что участок скоростного разупрочнения («asperity») совершенно не обязательно является областью с высоким или низким, по отношению к остальной площади разлома, коэффициентом трения. Аналогично участки остановки разрыва, часто ассоциируемые с прочными областями, зачастую напротив, сложены малопрочными материалами с низким коэффициентом трения и пониженным уровнем нормальных напряжений [Scholz, Campos, 2012].

Выводы

1. Стартуя на участке скоростного разупрочнения («asperity»), разрыв распространяется по напряженному тектоническому разлому до участка, обладающего свойствами скоростного упрочнения. Это может быть область либо с пониженными значениями эффективных напряжений нормальных к плоскости разлома, либо выполненная иным геоматериалом.

2. Величина реализованного в ходе динамической подвижки сейсмического момента M_0 определяется характерным размером области разлома, вовлеченной в движение, то есть расположением относительно точки старта разрыва участков скоростного упрочнения – барьеров, в то время как изменение скорости реализации момента во времени $M_0(t)$ зависит от количества и взаимного расположения участков скоростного разупрочнения («asperities»).

Работы проводились при финансовой поддержке РФФИ (проект № 16-05-00694) и в рамках государственного задания ИДГ РАН (проект № 0146-2014-0008).

Литература

Архипов В.Н., Борисов В.А., Будков А.М. и др. Механическое действие ядерного взрыва. М. : Физматлит, 2003. – 550 с.

Кочарян Г.Г. Геомеханика разломов. М. : ГЕОС, 2016. – 432 с.

Aki, K., M. Bouchon, B. Chouet, and S. Das. Quantitative prediction of strong motion for a potential earthquake fault, *Ann. Geophys.*, 30, 341–368, 1977.

Kanamori, H., Stewart G.S. Seismological spectr of the Guatemala earthquake of February 4, 1976, *J. Geophys. Res.* 1978, 83, 3427– 3434.

Corbi, F., Funiello F., Moroni M., van Dinther Y., Mai P. M., Dalguer L. A., and Faccenna C. The seismic cycle at subduction thrusts: 1. Insights from laboratory models, *J. Geophys. Res. Solid Earth* 2017, 118, 1483–1501, doi:10.1029/2012JB009481.

Dieterich, J.H. Modeling of Rock Friction: 1. Experimental results and constitutive equations // *J. Geophys. Res.* 1979. V. 84. P. 2161–2168.

Rubinstein S.M., Cohen, G., Fineberg J. Detachment fronts and the onset of dynamic friction // *Nature.* 2004. V. 430. P. 1005–1009.

Scholz, C.H. Earthquakes and friction laws, *Nature*, 1998 391, 37–42, doi:10.1038/34097.

Scholz C.H., Campos J. The seismic coupling of subduction zones revisited, *J. Geophys. Res.*, 117, 2012. B05310, doi:10.1029/ 2011JB009003.