

УДК 551.24

ОСОБЕННОСТИ РАЗРЫВООБРАЗОВАНИЯ В РЕОЛОГИЧЕСКИ НЕОДНОРОДНОМ ОСАДОЧНОМ ЧЕХЛЕ НАД АКТИВНЫМИ РАЗЛОМАМИ ФУНДАМЕНТА: ПО РЕЗУЛЬТАТАМ ФИЗИЧЕСКОГО МОДЕЛИРОВАНИЯ

© 2022 г. С. А. Борняков^{1*}, С. П. Примина², Ю. В. Чубакова²¹ Институт земной коры СО РАН, г. Иркутск, Россия² Иркутский государственный университет, г. Иркутск, Россия

*E-mail: bornyak@crust.irk.ru

Выполнено физическое моделирование процесса формирования сдвиговой зоны в однослойных моделях с целью выяснения особенностей разломообразования в реологически неоднородном осадочном чехле платформы над активными разломами фундамента. Модельными материалами служили водная паста монтмориллонитовой глины и влажный песок. Показано, что толщина деформируемого слоя определяет ширину зоны сдвига, время начала в ней разрывообразования и длительность реализации стадий её развития, а его реологические свойства определяют особенности её внутренней разрывной структуры.

Ключевые слова: физическое моделирование, зона сдвига, стадии разрывообразования, ширина зоны

Для цитирования: Борняков С.А., Примина С.П., Чубакова Ю.В. Особенности разрывообразования в реологически неоднородном осадочном чехле над активными разломами фундамента: по результатам физического моделирования // Динамические процессы в геосферах, 2022, т. 14. № 1. С. 29–38.

http://doi.org/10.26006/22228535_2022_14_1_29.

Введение

Большинство месторождений нефти и газа располагаются в осадочных чехлах платформ, сложенных разновозрастными комплексами пород, отличающихся по составу, и нарушенных многочисленными зонами разломов. Разломы во многом определяют миграцию нефтидов по разрезу осадочного чехла и их локализацию в коллекторах. В связи с этим, для более эффективной организации поисковых работ на лицензионных площадях, а также для выбора потенциально безаварийных мест расположения эксплуатационных скважин на месторождениях необходима информация о пространственном положении разломных зон и их внутреннем строении. Изучение разломов полевыми структурно-геологическими методами в пределах платформ не представляется возможным из-за слабой расчлененности рельефа и отсутствия обнажений, в связи с чем, основную информацию о них можно получить посредством сейсмологических методов. При этом специалисты при интерпретации полученных после компьютерной обработки сейсмических разрезов нередко затрудняются идентифицировать разломы по выделившимся на них структурным неоднородностям. Это обусловлено двумя причинами.

Первая причина связана с особенностью развития разломов в осадочном чехле платформ. Известно, что формирование зоны разломов происходит в три стадии [Шерман и др., 1991; Семинский, 2003]. В первую, раннюю дизъюнктивную стадию разлом представлен широкой зоной с высокой плотностью непротивоположных разрывных нарушений. Во вторую, позднюю дизъюнктивную стадию эти разрывные нарушения трансформируются в несколько крупных разрывов, которые впоследствии объединяются в единый магистральный (стадия полного разрушения) (рис. 1).

В работе [Семинский и др., 2021] на примере северного Ямала показано, что структура осадочного чехла является зонно-блоковой и отражает разломно-блоковую структуру фундамента. Внутреннее строение межблоковых зон чехла соответствует ранней дизъюнктивной стадии, представлено густой сетью трещин и разрывов 2-го порядка, плохо отражающихся в сейсмических волновых полях.

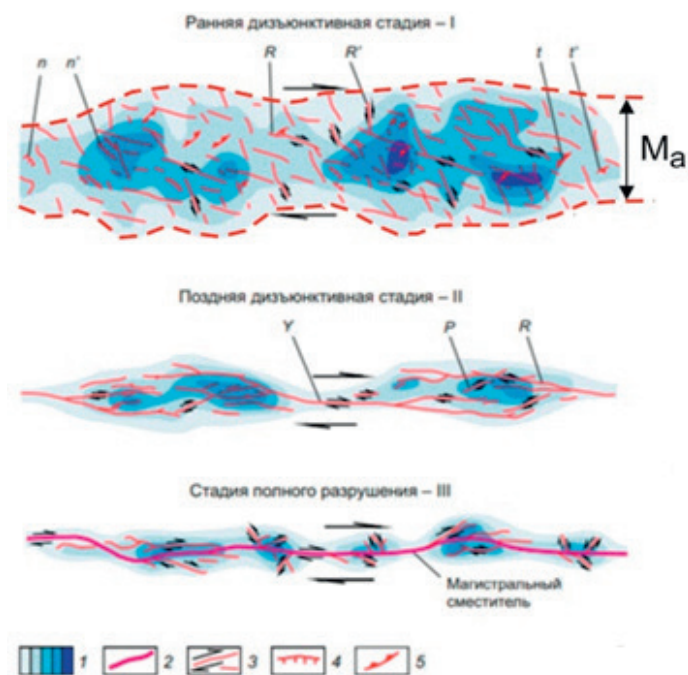


Рис. 1. Структура зоны разломов на трех главных стадиях развития (на примере правого сдвига) [Семинский, 2014; 2015]. 1 – участки с различным количеством разрывов в единице площади; 2 – магистральный сместитель (разрыв 1-го порядка); 3–5 – сдвиги (3), сбросы (4) и надвиги (5) 2-го порядка. Латинские буквы – разнотипные разрывы 2-го порядка (R' , R , n' , n , t' , t , P) и магистральный сместитель 1-го порядка (Y)

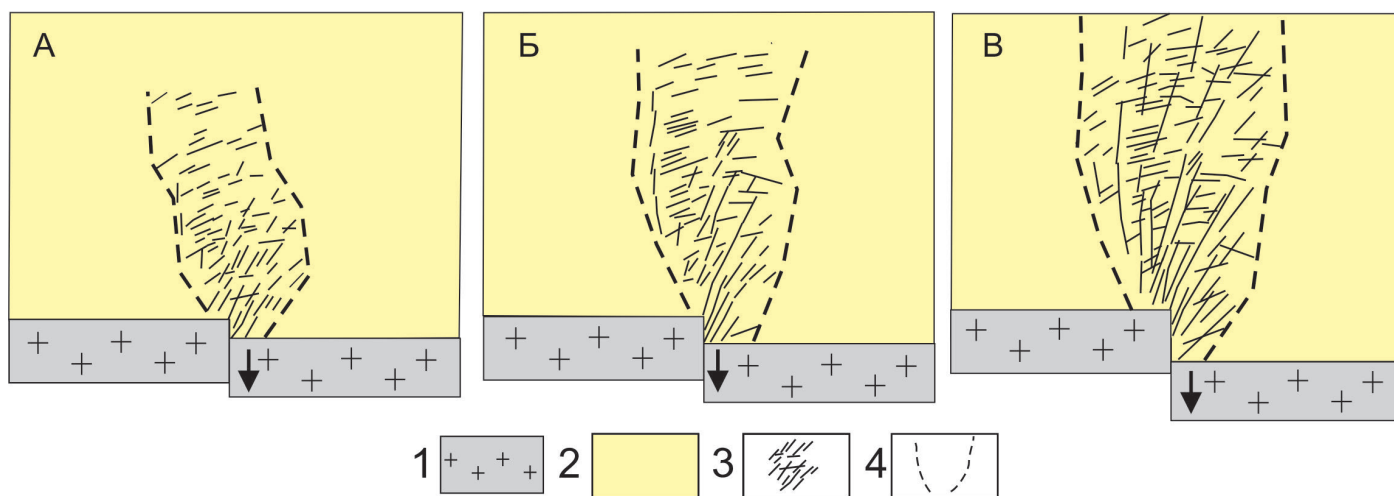
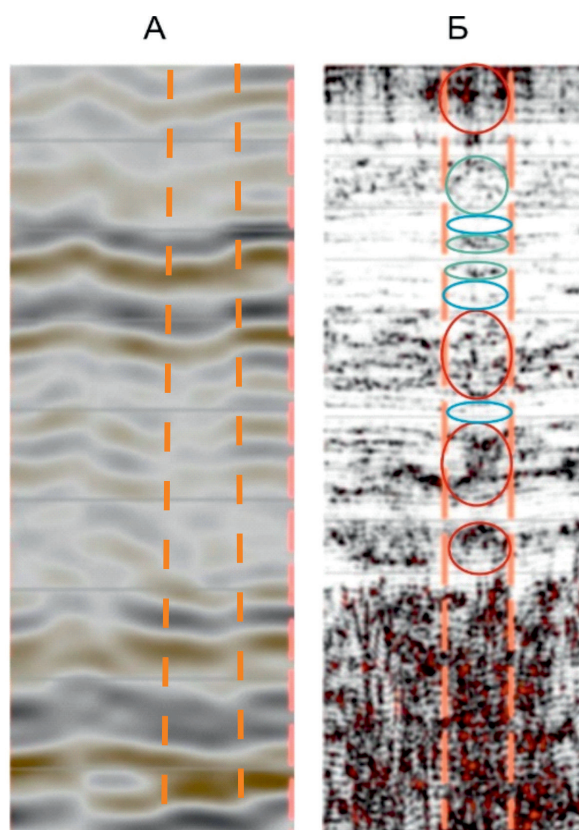


Рис. 2. Схематичное изображение последовательности формирования зоны сброса в однослойной модели осадочного чехла над активным разломом фундамента

Вторая причина связана со спецификой деформации и разрушения реологически неоднородного осадочного чехла, сложенного многослойными комплексами пород разного возраста и состава. Экспериментальное воспроизведение процесса формирования зоны сброса в однослойной модели осадочного чехла над активным разломом фундамента показывает, что по мере увеличения амплитуды смещения блоков фундамента процесс разрывообразования в зоне постепенно распространяется снизу вверх по модели (рис. 2).

В многослойной модели с отличающимися реологическими свойствами слоев специфика формирования такой зоны разлома отличается от описанной, о чем свидетельствует представленный



○ - сильно, ○ - умеренно и
○ - слабо нарушенные объемы разреза

Рис. 3. Оригинальный сейсморазрез (А) и результат его компьютерной обработки (Б). Оранжевым штрих-пунктиром оконтурены границы зоны разлома

оригинальный сейсмический разрез (рис. 3А) и полученная по результатам его компьютерной обработки схема распределения разрывных нарушений (рис. 3Б).

Видно, что разрывная структура зоны разлома фрагментарна и представлена чередующимися по вертикали локальными объемами сильной, умеренной и слабой нарушенности пород (рис. 3). В чем же причина такого фрагментарного строения зоны разлома? Поиску ответа на этот вопрос посвящена настоящая статья, фактурную основу которой составляют результаты физического моделирования процессов разрывообразования в осадочном чехле над активными разломами фундамента.

Методика моделирования, фактический материал и методы обработки

Экспериментальное оборудование и объект моделирования

Моделирование проводилось на установке «Разлом» (рис. 4). Рабочая поверхность установки состоит из трех штампов, различные комбинации движений которых позволяют задавать в размещенных на них моделях все основные виды деформаций: сжатие, растяжение и сдвиг со скоростями 10^{-3} , 10^{-4} и 10^{-5} м/с.



Рис. 4. Установка «Разлом» для моделирования тектонических процессов в естественном поле силы тяжести

Модельные материалы

В качестве модельных материалов использованы водная паста монтмориллонитовой глины и влажный песок. Перечисленные материалы часто используются в практике физического моделирования [Dooley, Schreurs, 2012; Graveleau, Malavieille, 2012]. Этим модельным материалам соответствуют в природе плотные глины и песчаники, соответственно.

Условия подобия

Для определения граничных условий экспериментов, проводимых на моделях из водной пасты монтмориллонитовой глины, проявляющей при деформировании свойства вязкости и пластичности, был использован критерий подобия [Гзовский, 1975]:

$$C_{\eta} = C_{\rho} \cdot C_g \cdot C_L \cdot C_T \quad (1)$$

где η – вязкость, Па·с; ρ – плотность, кг/м³; g – ускорение свободного падения, м/с²; L – линейные размеры, м; t – время, с.

При $C_{\rho} \approx 0.7$, $C_g = 1$ и $C_T \approx 10^{-10}$ равенство в уравнении 2 достигается при значении $C_{\eta} \approx 10^{-15}$. С учетом вязкости глин в поздней стадии диагенеза $\eta \approx 1018$ Па·с [Осипов и др., 2001] вязкость модельного материала должна составлять 10³ Па·с. При выбранном значении C_T 1 минута эксперимента соответствовала 10000 лет природного процесса.

Поскольку влажный песок не обладает вязкостью, то для него использовался критерий подобия, включающий параметр прочности на сдвиг:

$$C_{\tau} = C_{\rho} \cdot C_g \cdot C_L,$$

где τ – прочность на сдвиг. В соответствии с ним и, исходя из усредненных значений прочностных свойств пород осадочного чехла (песчаников, алевролитов, аргиллитов, плотных глин) и линейных размеров природного объекта, рассчитывались граничные условия экспериментов. Для использованных нами модельных материалов прочность на сдвиг составляла: водонасыщенной пасты глины – 3500–4000 Па, а влажного песка – 12000–12500 Па. Первому модельному материалу соответствуют в природе твердые глины, аргиллиты и алевролиты, песчаники. Их прочность на сдвиг характеризуется следующими средними значениями: 35, 220 и 350 МПа соответственно. При $C_{\tau} \approx 10^{-5}$, $C_{\rho} \approx 0.7$ и $C_g = 1$ равенство в уравнении 2 достигается при значении $C_L \approx 1.5 \cdot 10^{-5}$.

Техника подготовки и проведения экспериментов

Модель, имитирующая осадочный чехол, располагалась на рабочей поверхности установки на штампах А, Б и В, имитирующих блоки фундамента (рис. 4, 5А). В ходе эксперимента штампы А и Б оставались неподвижными, а штамп В смещался относительно них в горизонтальном направлении, что обеспечивало формирование сдвиговой зоны в выше лежащей модели. При подготовке модели на её плановую поверхность наносилась сетка параллельных реперных линий, по искривлению которых в процессе эксперимента оценивалась ширина зоны пластических деформаций (рис. 5Б).

Эксперименты проводились на однослойных моделях. На каждом модельном материале выполнено: по 5 экспериментов с последовательным изменением от эксперимента к эксперименту толщины модели

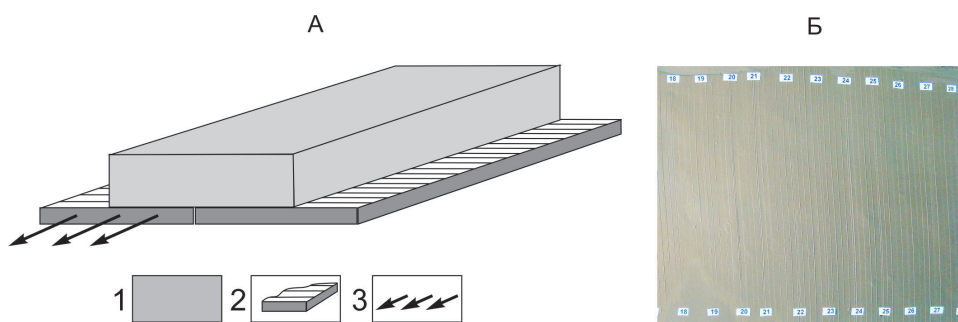


Рис. 5. Схема эксперимента (А) и фото фрагмента плановой поверхности модели с нанесенной на неё сеткой реперных линий (Б). 1 – модель; 2 – штампы экспериментальной установки; 3 – направление смещения активного штампа

от 0.01 до 0.05 м через 0.01 м, при постоянной скорости деформирования ($V = 10^{-5}$ м/с). Ход каждого эксперимента фотографировался с заданной дискретностью. Полученные с моделей фотографии впоследствии использовались для построения структурных схем и для замеров необходимых количественных параметров.

Полученный с моделей фактический материал.

В процессе экспериментов фиксировалось время появления в формирующейся сдвиговой зоне первых разрывов, т.е. время начала ранней дизъюнктивной стадии (T_1), время реализации этой стадии (T_2), время поздней дизъюнктивной стадии (T_3) и время реализации стадии полного разрушения (T_4). По фотографиям строились схемы разрывов, с которых снимались замеры ширины сдвиговой зоны (Ma), определяемой по латеральному распространению слагающих её внутреннюю структуру разрывов (рис. 6).

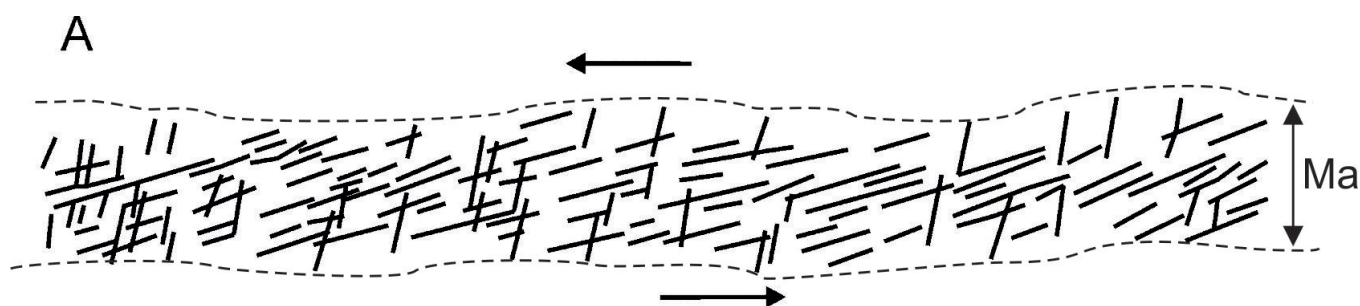


Рис. 6. Пример структурной схемы сдвиговой зоны в третью стадию полного разрушения

Результаты

Результаты представлены двумя группами графических материалов.

Первая группа, представлена серией графиков, показывающих влияние толщины моделей разной реологии на ширину сдвиговых зон Ma (рис. 7), а также на временные параметры T_1 , T_2 , T_3 и T_4 (рис. 8).

Вторая группа демонстрирует влияние реологических свойств моделей на особенности внутренней разрывной структуры формирующихся в них сдвиговых зон. На рисунках приведены фотографии сдвиговых зон в моделях из монтмориллонитовой глины (рис. 9) и влажного песка (рис. 10) в разные стадии их развития (А, Б, В) и составленные по ним структурные схемы (А', Б', В').

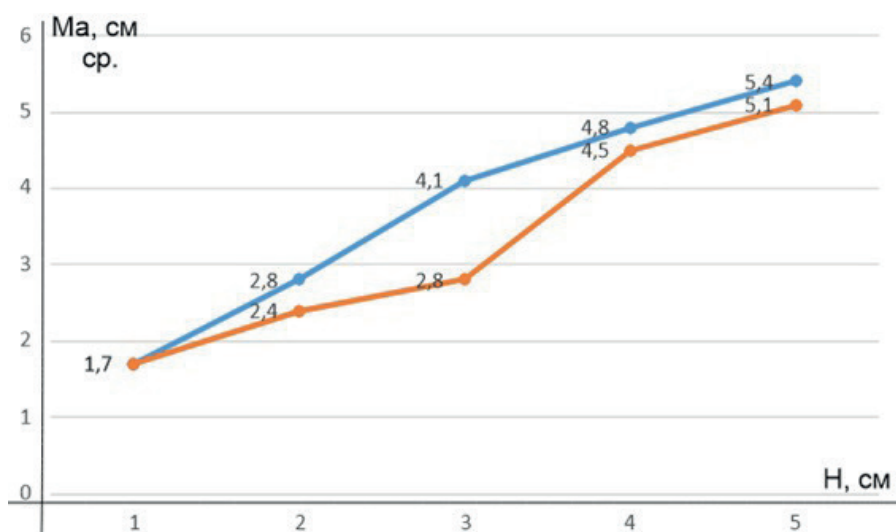


Рис. 7. Графики зависимости ширины зоны латерального распространения разрывов в сдвиговой зоне Ma , формирующейся в моделях с разными реологическими свойствами

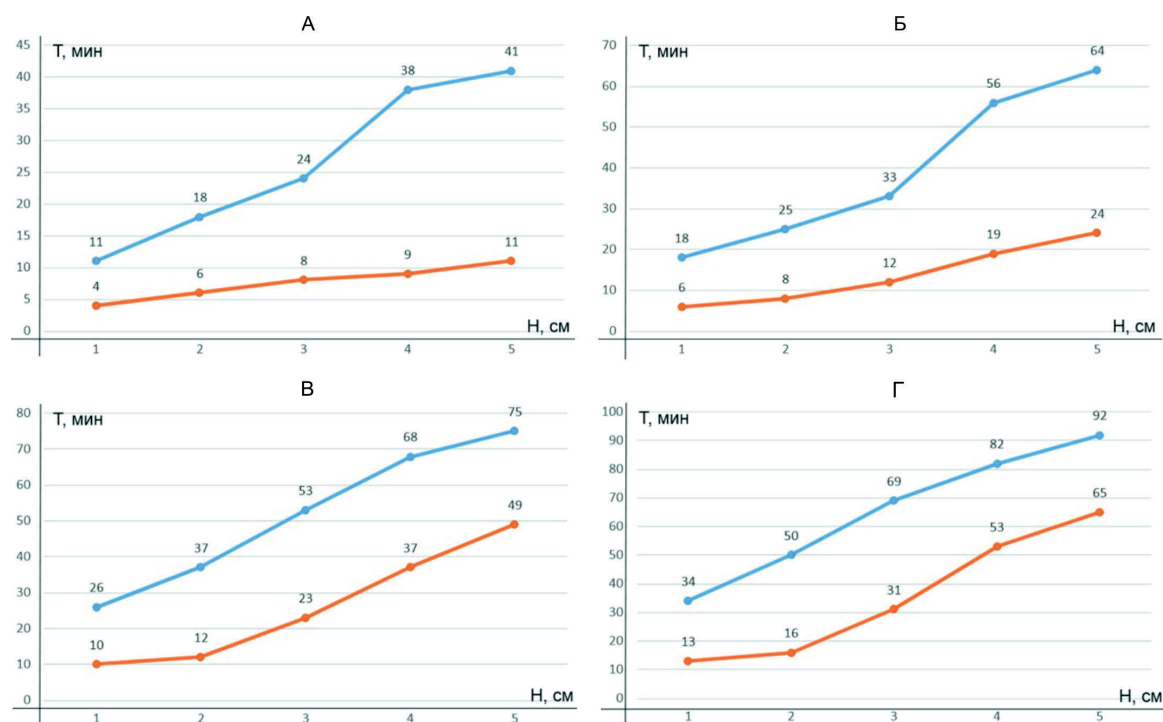


Рис. 8. Графики зависимости реализации времен T_1 (А), T_2 (Б), T_3 (В) и T_4 (Г) при формировании сдвиговой зоны от толщины моделей с разными реологическими свойствами

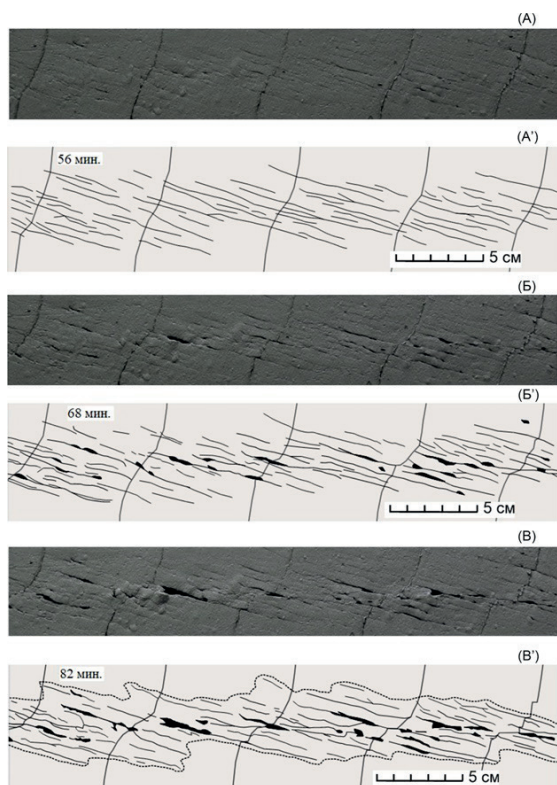


Рис. 9. Фото сдвиговой зоны в модели из монтмориллонитовой глины в: раннюю дизъюнктивную стадию (А), позднюю дизъюнктивную стадию (Б) и стадию полного разрушения (В) и составленные по ним структурные схемы (А', Б', В') соответственно

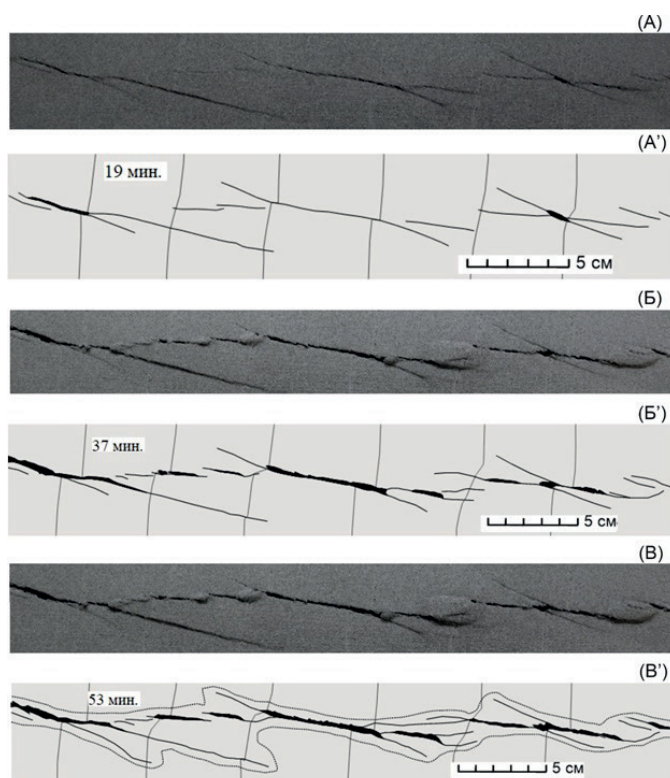


Рис. 10. Фото сдвиговой зоны в модели из влажного песка в: раннюю дизъюнктивную стадию (А), позднюю дизъюнктивную стадию (Б) и стадию полного разрушения (В) и составленные по ним структурные схемы (А', Б', В') соответственно

Обсуждение результатов

Зависимость ширины сдвиговой зоны от толщины модели и скорости деформирования

Из графиков, отражающих зависимость ширины сдвиговых зон в моделях из монтмориллонитовой глины и влажного песка от толщины моделей, следует, что в целом для обоих типов моделей выдерживается устойчивая положительная зависимость параметра Ma от параметра H , показывающая, что чем толще деформируемый слой, тем шире формирующаяся в нем сдвиговая зона (рис. 7). При этом, при прочих равных условиях, максимальная ширина наблюдается у сдвиговых зон, формирующихся в моделях из водной пасты монтмориллонитовой глины, минимальная, в моделях из песка. Из этого следует, что в природной ситуации ширина сдвиговой зоны в осадочном чехле, сложенном слоями пород разной мощности и разного состава, будет изменяться по его вертикальному разрезу. Так, в слоях маломощных и склонных к хрупкому разрушению (например, в песчаниках и алевролитах) она будет меньше, чем в слоях более мощных и проявляющих при деформации свойства вязкости и пластичности (например глины, угли, слабо литифицированные аргиллиты). В связи с этим, исходя из отмеченных результатов моделирования, можно предложить модельное представление о вариации ширины зоны разлома по вертикальному разрезу реологически расслоенного осадочного чехла (рис. 11).

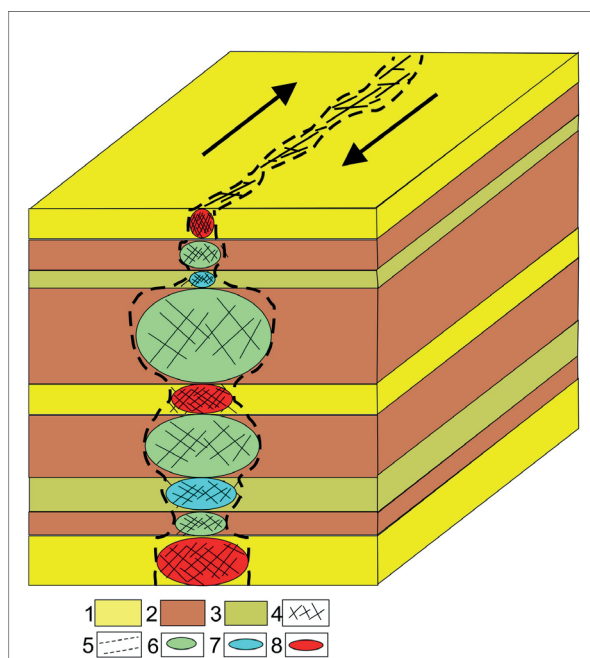


Рис. 11. Вертикальное строение сдвиговой зоны в гипотетическом многослойном осадочном чехле с разными реологическими свойствами слоев. Состав слоев: 1 – песчаники, 2 – плотные глины; 3 – алевролиты; 4 – разрывы; 5 – латеральные границы сдвиговой зоны. Области слабой (6), умеренной (7) и сильной (8) нарушенности

Зависимость времени проявления основных моментов развития процесса разрывообразования в сдвиговой зоне от толщины модели и реологических свойств модельного материала

Приведенные на рисунке 8 графики, характеризующие зависимость времени проявления основных моментов развития процесса разрывообразования в сдвиговой зоне от толщины модели и реологических свойств модельного материала, показывают:

- какой интервал времени от начала эксперимента необходим для появления первых разрывов в формирующейся сдвиговой зоне (T_1);
- через какие временные интервалы происходят переходы этого процесса из первой стадии во вторую (T_2), из второй в третью (T_3);
- через какое время закладывается магистральный разрыв (T_4).

Из графиков следует, что все перечисленные контрольные интервалы увеличиваются пропорционально увеличению толщины модели (рис. 8А,Б,В,Г). При этом, в моделях из водной пасты монтмориллонитовой глины процесс формирования сдвиговой зоны развивается в 2–3 раза медленней, чем в моделях из влажного песка. Например, когда в глиняной модели толщиной 0.03 м только начинается

процесс разрывообразования (рис. 8А), в модели из влажного песка той же толщины этот процесс уже переходит в стадию полного разрушения с формированием магистрального шва (рис. 8Г).

Зависимость внутренней разрывной структуры сдвиговой зоны от толщины модели и реологических свойств модельного материала

Из сопоставления схем, приведенных на рис. 9, следует, что с увеличением толщины модели сдвиговые зоны в моделях из водной пасты монтмориллонитовой глины становятся шире, и многочисленные

непротяженные спрямленные разрывы уступают место более крупным разрывам сложной морфологии, нередко имеющим по своему простиранию зияющие сегменты, развивающиеся в условиях локальной трансенсии по типу «*pull-apart*» [Mannet. al., 1983]. Таким образом, с увеличением толщины модели наблюдается масштабное увеличение длин разрывов и снижение частоты их встречаемости по простиранию сдвиговых зон. Принципиальных изменений в разрывной структуре зон при этом не происходит (рис. 9). Аналогичные структурные ситуации характерны и для моделей из влажного песка (рис. 10).

Существенное влияние на разрывную структуру сдвиговых зон оказывают реологические свойства модельного материала. Если в моделях из водной пасты монтмориллонитовой глины сдвиговая зона имеет незначительно варьирующую по простиранию ширину и образована густой сетью разрывов разных рангов длины преимущественно одного направления (рис. 9В,В'), то в моделях из влажного песка ширина зоны по простиранию кратно меняется, а её внутренняя разрывная структура представлена редкими крупными, нередко зияющими разрывами с меняющейся пространственной ориентировкой сместителей (рис. 10В,В').

Выводы

Приведенные результаты моделирования показывают:

1. Толщина деформируемого слоя определяет ширину зоны сдвига, время начала в ней разрывообразования и длительность реализации стадий её развития.
2. Реологические свойства деформируемого слоя определяют особенности внутренней разрывной структуры, формирующейся в нем сдвиговой зоны.

Таким образом, в многослойном осадочном чехле с различной толщиной и разными реологическими свойствами слоев сдвиговая зона, соответственно, будет иметь существенно различные ширину и степень нарушенности в пределах каждого из слоев разреза.

Финансирование

Исследование выполнено по проекту «Современная геодинамика, механизмы деструкции литосферы и опасные геологические процессы в Центральной Азии» (№ FWEF-2021-0009).

Список литературы

- Гзовский М.В. Основы тектонофизики. М. : Наука, 1975. 536 с.
- Осипов В.И., Соколов В.Н., Еремеев В.В. Глинистые покрышки нефтяных и газовых месторождений. М. : Наука, 2001. 238 с.
- Осипов В.И., Соколов В.Н., Еремеев В.В. Глинистые покрышки нефтяных и газовых месторождений. М. : Наука, 2001. 238 с.
- Семинский К.Ж. Внутренняя структура континентальных разломных зон. Тектонофизический аспект. Новосибирск: Изд-во СО РАН, Филиал «Гео». 2003. 243 с.
- Семинский К. Ж. Спецкартирование разломных зон земной коры. Статья 1: Теоретические основы и принципы // Геодинамика и тектонофизика. 2014. Т. 5. № 2. С. 445–467. <https://doi.org/10.5800/GT-2014-5-2-0136>.
- Семинский К.Ж. Спецкартирование разломных зон земной коры. Статья 2: Основные этапы и перспективы // Геодинамика и тектонофизика. 2015. Т. 6. № 1. С. 1–43. <https://doi.org/10.5800/GT-2015-6-1-0170>.
- Семинский К.Ж., Бурзунова Ю.П., Мирошниченко А.И., Борняков С.А., Нежданов А.А., Ершов А.В., Смирнов А.С., Буддо И.В., Семинский А.К., Черемных А.С., Качинская И.В. Специфика проявления разломов в платформенном чехле: результаты применения тектонофизического подхода к исследованию Тамбейского месторождения углеводородов (п-ов Ямал) // Геодинамика и тектонофизика. 2021. Т. 12,

№ 4. С. 969–991. DOI: 10.5800/GT-2021-12-4-0566.

Шерман С.И., Семинский К.Ж. Борняков С.А. и др. Разломообразование в литосфере: зоны сдвига. Новосибирск: Наука, 1991, 261 с.

Dooley T.P., Schreurs G. Analogue modelling of intraplate strike-slip tectonics: A review and new experimental results // *Tectonophysics*, 574–575. (2012). 1–71.

Graveleau F., Malavieille J., Dominguez S. Experimental modelling of orogenic wedges: A review // *Tectonophysics*. 2012. V. 538–540, pp. 1–66.

Mann, P., Hempton, M.R., Bradley, D.C., Burke, K. Development of pull-apart basins // *Journal of Geology*, 1983, V. 91, p. 529–554. DOI: 10.1086/628803.

FEATURES OF RUPTURE FORMATION IN A RHEOLOGICALLY HETEROGENEOUS SEDIMENTARY COVER OVER ACTIVE FAULTS FOUNDATION : ACCORDING TO THE PHYSICAL MODELING RESULTS

S. A. Bornyakov^{1*}, S. P. Primina², Y. V. Chubakova²

¹ *Institute of the Earth's Crust SB RAS, Irkutsk, Russia*

² *Irkutsk State University, Irkutsk, Russia*

*E-mail: bornyak@crust.irk.ru

Physical modeling of the process of formation of the shear zone in single-layer ones is carried out in order to elucidate the features of fracture formation in the rheologically inhomogeneous sedimentary cover of the platform over the active fractures of the foundation. Model materials were montmorillonite clay water paste and wet sand. It is shown that the thickness of the deformable layer determines the width of the shear zone, the time of onset of rupture formation in it and the duration of the implementation of the stages of its development, and its rheological properties determine the features of its internal discontinuous structure.

Keywords: physical modeling, shear zone, stages of rupture formation, width.