Геология нефти и газа

УДК 551.24 https://doi.org/10.26516/2541-9641.2022.3.7

Особенности разрывообразования в реологически неоднородном осадочном чехле над активными разломами фундамента: по результатам физического моделирования

С.А. Борняков ¹, С.П. Примина ², Ю.В. Чубакова ²

¹Институт земной коры СО РАН, г. Иркутск, Россия

²Иркутский государственный университет, г. Иркутск, Россия

Аннотация. Выполнено физическое моделирование процесса формирования сдвиговой зоны в однослойных и многослойных моделях моделях с целью выяснения особенностей разломообразования в реологически неоднородном осадочном чехле платформы над активными разломами фундамента. Модельными материалами служили водная паста монтмориллонитовой глины, влажный песок и их композит. На примере однослойных моделей 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. Результаты моделирования на реологически неоднородных многослойных моделях, показали, что ширина формирующейся в них сдвиговой зоны не остается постоянной по вертикальному и определяется свойствами модельного материала.

Ключевые слова: осадочный чехол, месторождения нефти, физическое моделирование, зона сдвига, стадии разрывообразования, ширина зоны.

Features of rupture formation in a rheologically heterogeneous sedimentary cover over active foundation faults: according to the results of physical modeling

S.A. Bornyakov¹, S.P. Primina², Yu.V. Chubakova²

¹ Institute of the Earth's Crust, Siberian Branch of RAS, Irkutsk, Russia ² Irkutsk State University, Irkutsk, Russia

Abstract. Physical modeling of the process of formation of the shear zone in single-layer and multilayer models of models is carried out in order to elucidate the features of fault formation in the rheologically heterogeneous sedimentary cover of the platform over the active fractures of the foundation. Model materials were montmorillonite clay water paste, wet sand and their composite. On the example of single-layer models, it is shown that the thickness of the deformable layer determines the width of the shear zone, the time of the 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. The results of modeling on rheologically heterogeneous multilayer models showed that the width of the shear zone formed in them does not remain constant in vertical and is determined by the properties of the model material.

Keywords: about the cage cover, oil fields, physical modeling, shear zone, stage and rupture formation, zone width.

Введение

Большинство континентальных месторождений нефти и газа располагаются в осадочных чехлах платформ, сложенных разновозкомплексами растными пород, отличающихся по составу, и нарушеных многочисленными зонами разломов. Разломы во многом определяют миграцию нафтидов 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 нефтегазоносных областей платформ затруднено 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 компьютеробработки сейсмических разрезов ной 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 рамках трех стадий (Шерман и др., 1991; Семинский, 2003). В первую раннюю дизъюнктивную стадию разлом представлен широкой зоной с высокой непротяженных разрывных плотностью 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). Платформы характеризуются слабой тектонической активностью вследствие чего развитие разломов в их осадочном чехле редко выходило за рамки ранней дизъюнктивной стадии (Семинский и др., 2021). Таким образом, разломы в осадочном чехле чаще всего представлены в виде зон повышенной плотности непротяженных малоамплитудных разрывных нарушений и поэтому плохо отражаются в сейсмических волновых полях.



Рис. 1. Структура разломной зоны (на примере правого сдвига) (Семинский, 2014, 2015). (а) – строение разломной зоны на трех главных стадиях развития: 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); (б) – эталонный парагенезис (трафарет) разрывов 2-го порядка для правосдвиговой зоны, который представлен в плоском варианте, позволяющем проводить анализ роза-диаграмм простираний разрывных нарушений природной сети; (в) – принципиальная схема поперечной зональности разлома, прошедшего в своем развитии все три стадии разрывообразования: 1 – трещиноватость; 2 – крупные трещины; 3 – сместитель, заполненный тектонитами; 4 – внешняя граница разломной зоны; 5 – слабонарушенный породный массив; 6 – главные элементы внутреннего строения разломной зоны, сформировавшиеся на разных стадиях разрывообразования. Ма – ширина сдвиговой зоны.

Fig. 1. The structure of the fault zone (on the example of the right shift) (Seminsky, 2014, 2015). (a)– the structure of the fault zone at three main stages of development: 1– areas with a different number of gaps per unit area; 2– main shifter (1st order break); 3-5– shifts (3), resets (4) and forwards (5) of the 2nd order. Latin letters are different 2nd order breaks (R', R, n', n, t', t, P) and a 1st-order highway shifter (Y); (b)– a reference paragenesis (stencil) of 2nd order breaks for the right-wing zone, which is presented in a flat version that allows the analysis of rose-diagrams of the extensions of discontinuous disturbances of the natural network; (c)– a schematic diagram of the transverse zonation of a fault that has passed in its development all three stages of rupture formation: 1– fracture; 2– large cracks; 3– a displacer filled with tectonites; 4– the outer boundary of the fault zone; 5– weakly disturbed rock massif; 6– the main elements of the internal structure of the fracture zone, formed at different stages of rupture formation. Ma is the width of the shear zone.

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 показывают, 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 слоёв специфика формирования такой зоны разлома отличается от описанной, о чем свидетельствует представленный ниже оригинальный сейсмический (рис. 3А) и полученная по результатам его компьютерной обработки в схема распределения по нему разрывных нарушений (рис. 3Б).



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

Fig. 2. Schematic representation of the discharge zone formation sequence in a single-layer sedimentation cover model over the active foundation fault in the cover

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

1. Методика моделирования, фактический материал и методы обработки

1.1. Экспериментальное оборудование и объект моделирования

Моделирование проводилось на установке «Разлом» (рис. 4А). Рабочая поверхность установки состоит из трёх штампов, различные комбинации движений которых позволяют задавать в размещённых на них моделях все основные виды деформаций, — сжатие, растяжение, сдвиг со скоростями 10⁻³, 10⁻⁴ и 10⁻⁵ м/с.

1.2. Модельные материалы

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

1.3. Условия подобия

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

 $C_{\eta} = C_{\rho} \cdot C_{g} \cdot C_{L} \cdot C_{t} (1),$

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 $\eta \approx 10^{18}$ Па·с [Осипов и др., 2001] вязкость модельного материала должна составлять 10^3 Па·с. При выбранном значении C_T 1 минута эксперимента соответствовала 10000 лет природного процесса.

Поскольку модели из песка не обладают вязкостью, то для них использовался критерий подобия, учитывающий прочностные свойства модельного материала:

$$C_{\tau} = C_{\rho} \cdot C_{g} \cdot C_{L} (2)$$

где т – прочность на сдвиг;

В соответствии с ним и, исходя из усреднённых 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 твёрдые глины, аргиллиты и алевролиты, песчаники. Их прочность на сдвиг хаследующими рактеризуется средними значениями: 35 МПа, 220 МПа 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 $C_L \approx 1.5 \cdot 10^{-5}$.



- слабо нарушенные объемы разреза

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

Fig. 3. The original seismic cut (A) and the result of its computer processing (B). Orange dash-dotted line outlines the boundaries of the fracture zone



Рис. 4. Установка «Разлом» для моделирования тектонических процессов в естественном поле силы тяжести. А, Б, В – подвижные штампы

Fig. 4. Rift installation for modeling tectonic processes in the natural field of gravity. A, B, C – movable stamps

1.4. 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 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.



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.

Fig. 5. The scheme of the experiment (A) and a photo of a fragment of the planned surface of the model with a grid of reference lines (**b**) applied to it.

1-model; 2-stamps of the experimental installation; 3 is the direction of displacement of the active stamp.

1.5. Полученный с моделей фактический материал

В процессе экспериментов фиксировалось время появления в формирующейся сдвиговой зоне первых разрывов, т. е. время начала ранней дизъюнктивной стадии (T₁), время реализации этой стадии (T₂), время поздней дизьюнктивной стадии (T₃) и время реализации стадии полного разрушения (T₄). 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. **Fig. 6**. An example of a shear zone structural diagram in the third stage of complete destruction.

2. Результаты

Результаты представлены тремя группами графических материалов.

Первая группа демонстрирует влияние реологических свойств моделей на особенности внутренней разрывной структуры формирующихся в них сдвиговых зон (рис. 7–9). На рисунках приведены фотографии сдвиговых зон в моделях из монтмориллонитовой глины (рис. 7), смеси монтмориллонитовой глины с песком (рис. 8) и влажного песка (рис. 9) в разные стадии их развития (А, Б, В) и составленные по ним структурные схемы (А', Б', В').

Вторая группа, представленная на рисунках 10, 11 и 12 отражает влияние скорости деформирования моделей на внутреннюю разрывную структуру формирующихся в них сдвиговых зон.

Третья группа, представлена серией графиков, показывающих влияние толщины моделей разной реологии на ширину зон $M_{\pi\pi}$ (рис. 13), M_a (рис. 14), а также на временные параметры T_1 (рис. 15), T_2 (рис. 16), T_3 (рис. 17) и T_4 (рис. 18).



Рис. 7. Фото сдвиговой зоны в модели из монтмориллонитовой глины в раннюю дизьюнктивную стадию (А), позднюю дизьюнктивную стадию (Б) и стадию полного разрушения (В) и её составленные по ним структурные схемы (А', Б', В') соответственно.

Fig. 7. Photo of the shear zone in the model from montmorillonite clay to the early disjunctive stage (A), the late disjunctive stage (B) and the stage of complete destruction (B) and its structural schemes compiled from them (A', \mathbf{b}' , \mathbf{B}'), respectively.



Рис. 8. Фото сдвиговой зоны в модели из смеси монтмориллонитовой глины и песка в: раннюю дизьюнктивную стадию (А), позднюю дизьюнктивную стадию (Б) и стадию полного разрушения (В) и её составленные по ним структурные схемы (А', Б', В') соответственно

Fig. 8. Photo of the shear zone in the model from a mixture of montmorillonite clay and sand in: early disjunctive stage (A), late disjunctive stage (B) and stage of complete destruction (B) and its structural schemes compiled from them (A', B', B'), respectively



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

Rice. 9. Photo of the shear zone in the wet sand model into: early disjunctive stage (A), late disjunctive stage (B) and stage of complete destruction (B) and its structural schemes compiled from them (A', B', B'), respectively



Рис. 10. Фото сдвиговой зоны в модели из влажного песка в: раннюю дизьюнктивную стадию (A), позднюю дизьюнктивную стадию (Б) и стадию полного разрушения (В) и её составленные по ним структурные схемы (A', Б', В') соответственно. Скорость деформирования модели 10^{-5} м/с. **Fig. 10.** Photo of the shear zone in the wet sand model in: early disjunctive stage (A), late disjunctive stage (Б) and complete destruction stage (B) and its structural schemes compiled from them (A', Б', В'), respectively. The deformation rate of the model is 10^{-5} m/s.



Рис. 11. Фото сдвиговой зоны в модели из влажного песка в: раннюю дизъюнктивную стадию (A), позднюю дизъюнктивную стадию (Б) и стадию полного разрушения (В) и её составленные по ним структурные схемы (A', Б', В') соответственно. Скорость деформирования модели 10^{-4} м/с. **Fig. 11.** Photo of the shear zone in the wet sand model to: early disjunctive stage (A), late disjunctive stage (B) and complete destruction stage (B) and its structural schemes compiled from them (A', Б', В'), respectively. The deformation rate of the model is 10^{-4} m/s.



Рис. 12. Фото сдвиговой зоны в модели из влажного песка в: раннюю дизъюнктивную стадию (А), позднюю дизъюнктивную стадию (Б) и стадию полного разрушения (В) и её составленные по ним структурные схемы (А', Б', В') соответственно. Скорость деформирования модели 10⁻³ м/с.

Fig. 12. Photo of the shear zone in the wet sand model in: the early disjunctive stage (A), the late disjunctive stage (\mathbf{B}) and the stage of complete destruction (B) and its structural schemes compiled from them (A', \mathbf{B} ', B'), respectively. The deformation rate of the model is 10^{-3} m / s.

Приведенные ниже графики демонстрируют влияние толщины модели Н и скорости деформирования V на ширину зоны пластических деформаций Мпл (рис. 14) и ширину зоны латерального распространения разрывов в сдвиговой зоне Ма (рис. 15), формирующейся в моделях с разными реологическими свойствами. Видно, что в целом, с увеличением толщины модели параметры Мпл и Ма возрастают. При этом, при прочих равных условиях, максимальные их значения характерны для моделей из монтмориллонитовой глины, а минимальные для моделей из песка.

Влияние скорости V деформирования моделей на Ма не является однозначным. Так, с её увеличением ширина сдвиговых зон в моделях из монтмориллонитовой глины и из её смеси с песком скорость появления сдвиговой зоны в целом уменьшается, тогда как в моделях из песка почти не меняется (рис. 16).



Рис. 13. Графики зависимости ширины зоны пластических деформаций Мпл от толщины моделей с разными реологическими свойствами

Fig. 13. Graphs of the dependence of the width of the zone of plastic deformations of the MPL on the thickness of models with different rheological properties





Fig. 14. Graphs of the dependence of the width of the lateral propagation zone of ruptures in the Shear zone Ma, formed in models with different rheological properties





Fig. 15. Graphs of the dependence of the time of appearance of the first gaps in the shear zone on the thickness of models with different rheological properties



Рис. 16. Графики зависимости времени реализации ранней дизъюнктивной стадии в сдвиговой зоне от толщины моделей с разными реологическими свойствами

Fig. 16. Graphs of the dependence of the implementation time of the early disjunctive stage in the shear zone on the thickness of models with different rheological properties





Fig. 17. Graphs of the dependence of the implementation time of the late disjunctive stage in the shear zone on the thickness of models with different rheological properties





Fig. 18. Graphs of the dependence of the implementation time of the stage of complete destruction in the shear zone on the thickness of models with different rheological properties

Выводы

В целом, приведенные результаты моделирования показывают, что:

1. Реологические свойства деформируемого слоя определяет особенности внутренней разрывной структуры, формирующейся в нем сдвиговой зоны.

2. Толщина деформируемого слоя определяет ширину зоны сдвига, время начала в ней

разрывообразования и длительность реализации стадий её развития.

С точки зрения полученных результатов в многослойном осадочном чехле с отличающимися реологическими свойствами слоев и их толщиной, сдвиговая зона (и другие типы зон) будет иметь существенно меняющиеся по вертикальному разрезу ширину и степень нарушенности при переходе из одного слоя в другой (рис. 19).



Рис. 19. 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

Fig. 19. Vertical structure of the shear zone in a hypothetical multilayer sedimentary cover with different rheological properties of layers. Composition of layers: 1– sandstones, 2– dense clays; 3– siltstones; 4– breaks; 5– lateral boundaries of the shear zone; Areas of weak (6), moderate (7) and strong (8) disturbance

Это предполагает, что выделение на сейсмическом разрезе зоны разлома постоянной ширины (рис. 20А) не совсем корректно. Ширина зоны будет меняться по вертикальному разрезу, как это показано черным пунктиром (рис. 20Б).



) - слабо нарушенные объемы разреза

Рис. 20. Оригинальный сейсморазрез (А) и результат его компьютерной обработки В программе «Петрель» (Б)

Fig. 20. Original seismic cut (A) and the result of its computer processing In the program "Petrel" (B)

Литература

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.

Ребецкий Ю.Л. Тектонические напряжения и прочность природных горных массивов. М.: ИКЦ «Академкнига», 2007.– 406 с.

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., Качинскас И.В. Специфика проявления разломов в платформенном чехле: результаты применения тектонофизического подхода к исследованию Тамбейского месторождения углеводородов (п-ов Ямал) // Геодинамика и тектонофизика. 2021;12(4):969-991. https://doi.org/10.5800/GT-2021-12-4-0566

Семинский К.Ж. Спецкартирование разломных зон земной коры. Статья 2: Основные этапы и перспективы // Геодинамика и тектонофизика. 2015. T. 6. № 1. C. 1–43. https://doi.org/10.5800/GT-2015-6-1-0170

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

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

Борняков Сергей Александрович,

кандидат геолого-минералогических наук, 664033 Иркутск, ул. Лермонтова, д. 128, Институт земной коры СО РАН, старший научный compydник, email: bonyak@crust.irk.ru. **Bornyakov Sergey Alexandrovich,** candidate of geological and mineralogical sciences, 664033 Irkutsk, st. Lermontova, d. 128, Institute of the Earth's Crust SB RAS, Senior Researcher, email: bonyak@crust.irk.ru.

Примина Светлана Павловна,

кандидат геолого-минералогических наук, 664003 Иркутск, ул. Ленина, д. 3, Иркутский государственный университет, геологический факультет, декан, 664003 Иркутск, ул. Ленина, д. 3, email: svetlana.primina@gmail.com. **Primina Svetlana Pavlovna,** Candidate of Geological and Mineralogical Sciences, 664003 Irkutsk, Lenin str., 3, Irkutsk State University, Faculty of Geology, dean, email: svetlana.primina@gmail.com.

Чубакова Юлия Витальевна,

магистрант каф. геологии нефти и газа геологического факультета Иркутского государственного университета, 664003 Иркутск, ул. Ленина, д. 3, email: ychubakova@mail.ru. **Chubakova Julia Vitalievna,** Master's student caf. Geology of Oil and Gas of the Geological Faculty of Irkutsk State University, 664003 Irkutsk, Lenin str., 3, email: ychubakova@mail.ru.

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.