

СОПОСТАВЛЕНИЕ МАТЕМАТИЧЕСКИХ И ФИЗИЧЕСКИХ МОДЕЛЕЙ СДВИГОВЫХ ЗОН

Н.С. Фролова, Д.С. Мягков, А.Н. Корбутяк

Сдвиги являются наиболее распространенным видом тектонических нарушений. С зонами сдвига в чехле над разломами фундамента часто связаны месторождения углеводородов, поэтому неудивителен повышенный интерес к таким структурам. Знание о структурных парагенезах сдвиговых зон, закономерностях развития, напряженном и деформированном состоянии может дать лишь моделирование – математическое и физическое. Последнее началось с классических работ Г. Клооса и В. Риделя (1928 и 1929 гг.), а затем осуществлялось многими исследователями во всем мире. Обзоры экспериментов приведены в статьях [1, 2, 3]. В первые десятилетия опыты проводились с использованием водной пасты глины в качестве чехла. На его поверхности был описан целый спектр разрывов разного ранга и ориентировки, формирующийся на разных стадиях развития сдвиговых зон. С началом экспериментов, в которых чехлом служил песок (классической считается работа, выполненная в 1986 г. М.А. Нейлором с соавторами), появилась возможность разрезать модели и получать представления о строении сдвиговой зоны в объеме. Так выяснилось, что сколы Риделя имеют пропеллерообразную форму. Следует заметить, что в моделях из песка, в отличие от моделей из глины, развиваются зоны локализованного разрушения лишь двух ориентировок. Примерно в это же время в нашей стране стало активно развиваться аналитическое математическое моделирование (А.С. Григорьев, А.В. Михайлова, Ю.Л. Ребецкий). Оно проводилось в линейной постановке в рамках механики сплошной среды, когда деформации малы, а зоны локализованного разрушения отсутствуют. С помощью такого моделирования можно изучить лишь кратковременную стадию процесса деформирования. Тем не менее, такое моделирование оказалось полезным, поскольку позволило получить представление о весьма сложном поле и траекториях главных напряжений, объяснить сложную конфигурацию сколов Риделя. Позже Ю.Л. Ребецкий добавил к своей математической модели действие девиаторных напряжений, возникающих, по его мнению, от массовых гравитационных сил [1]. Он также дал прогноз поведения сколов Риделя на разных глубинах. Сопоставление с физическими моделями показывает несоответствие ориентировки сколов Риделя близ «фундамента». Полезно сравнить также результаты физического и аналитического моделирования с данными о природных объектах, например, полученных с помощью 3D-сейсморазведки на севере Западной Сибири [4]. Можно видеть, что в природе углы сколов Риделя с проекцией разлома фундамента увеличиваются вверх по разрезу, достигая $40-50^\circ$ близ поверхности (рис. 2б). Это противоречит как физическим моделям, так и модели Ю.Л. Ребецкого (соответствующие углы в них составляют около 15°).

Дальнейшее развитие физического моделирования шло с усложнением его условий (денудация, осадконакопление, введение различных нарушений). Не так давно стали использовать методы, позволяющие оценивать поле деформаций на поверхности модели, такие, как PIV (метод цифровой трассерной визуализации) и аналогичные [3, 6]. Одновременно стало бурно развиваться численное математическое моделирование сдвиговых зон (Ю.П. Стефанов, Р.А. Бакеев, А.И. Шеменда и другие). Если сравнивать результаты полученных моделей с данными физического моделирования, то можно видеть значительные черты сходства. Это касается развития цветковых структур, поднятий между зонами локализованной деформации, соответствие зон разрежения и сжатия в окрестностях зон локализованной деформации (рис. 1). Если же сравнивать углы зон локализованной деформации с осью сдвига в численной модели [5] и их же (R-сколы) в физических моделях (рис. 2), то налицо большая разница в ориентировке. Зато данные численной модели вполне

соответствуют природным зонам сдвига (см. рис. 2). Это неудивительно, так как в работе [5] специально исследовалось влияние веса осадочных пород на строение сдвиговых зон. В физических же моделях мы учесть данный фактор принципиально не можем.

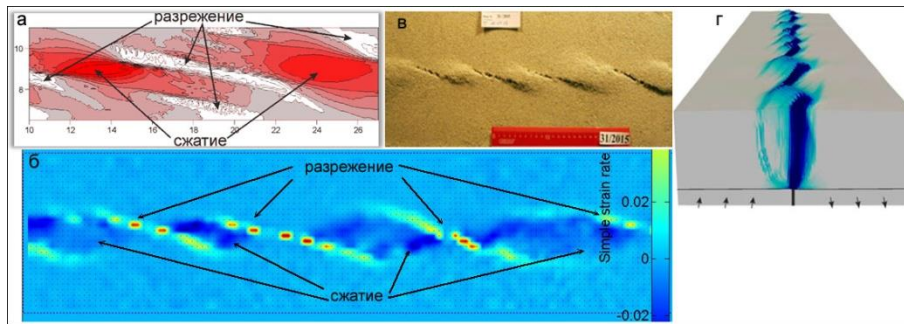


Рис. 1. Сравнение численной (а, г) и физической (б, в) моделей: а – распределение давления на локальном участке [5]; б – относительная скорость деформации, вычисленная методом PIV [6]. Оба метода показывают области разрежения (зоны локализованной деформации) и сжатия (участки подъема поверхности); в – песчаная модель [6]. Хорошо видны зоны локализованной деформации и регулярные валообразные поднятия; г – распределение интенсивности неупругой деформации в увеличенном масштабе смещений [5]. Неоднородный характер деформации приводит к вертикальным перемещениям на поверхности (ср. с рис. 1в).

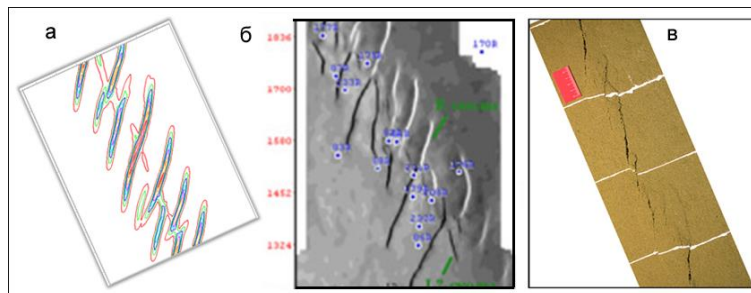


Рис. 2. Ориентировка зон локализованной деформации в верхней части чехла: а – численное моделирование [5], б – фрагмент карты углов наклона. Етыпуровский вал [4], в – модель с чехлом из песка.

С помощью метода численного моделирования получены некоторые результаты, которых мы не видели в физических моделях, например, образование двух магистральных разрывов или появление на поздней стадии развития сдвиговой зоны зон локализованной деформации с необычной ориентировкой [5]. Все это требует специальных исследований. Каждый из методов имеет свои преимущества и недостатки, необходимо их дальнейшее развитие, сравнение друг с другом и природными объектами.

Литература

1. Ребецкий Ю.Л., Михайлова А.В., Сим Л.А. Структуры разрушения в глубине зон сдвига. Результаты тектонофизического моделирования // Проблемы тектонофизики. К 40-летию создания М.В. Гзовским лаборатории тектонофизики в ИФЗ РАН. М: Изд. ИФЗ. 2008. С. 103-140.
2. Dooley T. P., Schreurs G. Analogue modelling of intraplate strike-slip tectonics: A review and new experimental results // Tectonophysics. 2012. V. 574–575. P. 1–71.
3. Борняков С.А., Семинский К.Ж., Буддо В.Ю., Мирошниченко А.И., Черемных А.В., Черемных А.С., Тарасова А.А. Основные закономерности разломообразования в

литосфере и их прикладные следствия (по результатам физического моделирования) // Геодинамика и тектонофизика. 2014. 5(4). С. 823-861.

4. Гогоненков Г.Н., Кашик А.С., Тимурзиев А.И. Горизонтальные сдвиги фундамента Западной Сибири. Геология нефти и газа. 2007. №3. С. 3–11.

5. Бакеев Р.А. Стефанов Ю.П. Влияние веса осадочных пород на строение сдвиговых разломных зон // Четвертая тектонофизическая конференция в ИФЗ РАН. Тектонофизика и актуальные вопросы наук о Земле: Материалы докладов Всероссийской конф. М: ИФЗ, 2016. Т. 2. С. 237-241.

6. Фролова Н.С., Корбутяк А.Н., Мишакина А.А., Корпач С.В. Развитие деформаций в зонах сдвига: результаты физического моделирования с использованием песка // Четвертая тектонофизическая конференция в ИФЗ РАН. Тектонофизика и актуальные вопросы наук о Земле: Материалы докладов Всероссийской конф. М: ИФЗ, 2016. Т. 2. С. 385-392.