



УДК 55

## ТЕОРЕТИЧЕСКИЕ И ЭКСПЕРИМЕНТАЛЬНЫЕ ДАННЫЕ ИССЛЕДОВАНИЙ ПО СКЛАДКООБРАЗОВАНИЮ

### THEORETICAL AND EXPERIMENTAL DATA FROM CRUSTAL FOLDING STUDIES

**Каграманов Каграман Наримано оглы**  
кандидат геолого-минералогических наук,  
старший научный сотрудник,  
Институт нефти и газа Министерства науки  
и образования Азербайджанской Республики  
gahraman@inbox.ru

**Gahramanov Gahraman Nariman ogly**  
Candidate of Geological  
and Mineralogical Sciences,  
Senior Researcher,  
Oil and Gas Institute of the Ministry  
of Science and Education  
of the Republic of Azerbaijan  
gahraman@inbox.ru

**Аннотация.** Процесс, при котором слоистые структуры в геологических телах изгибаются в результате деформации, называется «складкообразованием», а образующиеся при этом структуры – «складками». Наши исследования направлены на изучение классификации складок и анализ механизмов складкообразования лишь в районе ЮКВ. Нами сделана попытка дать объяснения теоретическим концепциям, образующим основу современной теории складкообразования, адекватную описываемым структурам рассматриваемого региона [1]. Изучение материалов и течение материалов называется реологией. Явления деформаций можно подразделить на упругую деформацию и течение. Последнее далее делится на пластическое и вязкое течения в зависимости от присутствия или отсутствия предела текучести. При снятии напряжения упругая деформация возвращается. Удобно использовать при отношении явлений течения реологических уравнений для того, чтобы выразить взаимосвязь между напряжением, деформаций и временем, принимая в качестве параметров реологические постоянные, такие, как коэффициенты вязкости.

**Annotation.** The process by which layered structures in geological bodies bend as a result of deformation is called «folding», and the resulting structures are called «folds». Our research is aimed at studying the classification of folds and analyzing the mechanisms of folding only in the area of the Southern Federal District. We have made an attempt to explain the theoretical concepts that form the basis of the modern theory of folding, adequate to the described structures of the region under consideration [1]. The study of materials and the flow of materials is called rheology. The phenomena of deformations can be divided into elastic deformation and flow. The latter is further divided into plastic and viscous flows, depending on the presence or absence of a yield point. When the stress is relieved, the elastic deformation returns. It is convenient to use rheological equations in relation to flow phenomena in order to express the relationship between stress, strain, and time, taking rheological constants such as viscosity coefficients as parameters.

**Ключевые слова:** складкообразования, реология, «доминирующая длина волны», эмпирическое зависимость, тектоническое течение, сжимающее напряжение.

**Keywords:** folding, rheology, «dominant wavelength», empirical dependence, tectonic flow, compressive stress.

Первыми объектами, с которыми проводились детальные теоретические и экспериментальные анализы складкообразования, основаны на представлениях Уиллиса и работах Био которыми положено начало количественных методов в изучении однослойных складок. Коснемся коротко данной теории складкообразования.

Био теоретически вывел смещение слоя  $\omega$  в направлении  $Y$  в процессе развитии деформации

$$\omega = \omega_0 \ell^{pt} = A_0 \ell^{pt} \cos \ell x, \tag{1}$$

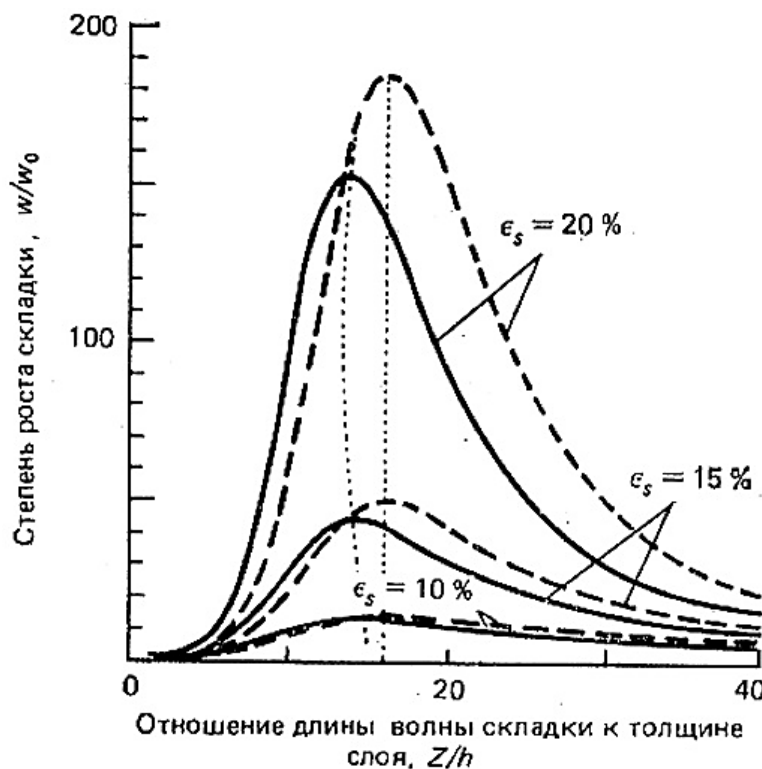
$$p = P / \left( \frac{4\eta_2}{h\ell} + \frac{1}{3}\eta_1 h^2 \ell^2 \right), \tag{2}$$

где  $\omega_0$  – начальная величина  $\omega$ ;  $t$  – время с начала деформации;  $\ell$  – волновое число складки ( $\ell = 2\pi / L$ ,  $L$  – длина волны складки,  $A_0$  – начальное значение амплитуды складки;  $P$  – боковое сжимающее напряжение;  $h$  – толщина слоя;  $\eta_1$  и  $\eta_2$  – коэффициенты вязкости для слоя и среды соответственно [5].

Фактор  $P$  показывает скорость роста складки: чем больше его величина, тем быстрее растет складка. Первый член в знаменателе на правой стороне уравнения (1, 2) соответствует сопротивле-



нию самого слоя деформации изгиба. Чем выше боковое напряжение сжатия и чем ниже коэффициенты вязкости слоя и среды, тем больше растет скорость образования складки. Приведенное выше решение показывает также, что скорость роста будет изменяться с изменением длины волны складки для данного бокового напряжения сжатия  $P$  (рис. 1).



**Рисунок 1** – Зависимость степени роста однослойной складки  $\omega/\omega_0$  (увеличение амплитуды) от отношения длины волны складки к толщине слоя ( $L/h$ ) в соответствии с теорией Био [4]

Био полагал, что длину волны складки следует постепенно подбирать в течение деформации для достижения величины небольшой скорости роста, т.е. величины, которая дает максимальное значение  $p$  в уравнении (6). Он называл такую длину «доминирующей длиной волны» (dominant wavelength) и получил из уравнения (1):

$$\frac{L_d}{h} = 2\pi \sqrt[3]{\frac{\eta_1}{6\eta_2}}. \tag{3}$$

Био представил детальный анализ выбора длины волны на основании уравнений (1) и (3) и показал, что, чем больше отношение вязкостей  $\eta_1/\eta_2$ , тем больше закономерные длины волн будут достигаться у складок.

Био а также Био и Оде решили эту задачу, точнее показали, что теория, основанная на уравнении для изгиба тонкой балки, довольно хорошо соблюдается при  $L_d/h > 10$ , и что сцепление между слоем и средой не изменяет в значительной степени доминирующую длину волны.

Пунктирные и сплошные линии показывают степень роста складки, полученную из уравнений (1) и (2). Линии, показанные точками, соединяют максимальные значения  $\omega/\omega_0$ ;  $\epsilon_s$  – средняя деформация системы, выраженная в логарифмической форме.

Теория Био сформулирована на основании принципа вязкоупругого соответствия. В дальнейшем Био разработал теорию, которая принималас во внимание однородное укорочение слоев. Он вывел

$$\frac{W}{W_0} = A(\epsilon_s) \ell^{\epsilon_s}, \tag{4}$$



где  $\epsilon_s = (P/4E)t$ . Средняя логарифмическая деформация системы  $\epsilon_s$  использована вместо времени  $t$  в уравнении (4), также  $\epsilon_s$  для природных складок рассчитывать проще, чем  $t$ . Степень

роста складки показывает отношение  $\frac{W}{W_0}$  в уравнении (4), которая равна производной величине  $A(\epsilon_s)$ ,  $A$  от условного складкообразования и  $\epsilon_s$ , определяемой однородным укорочением системы. При рассмотрении уравнения (4), выясняется, что в начале складка растет медленно, но скорость её роста экспонциально возрастает с развитием деформации.

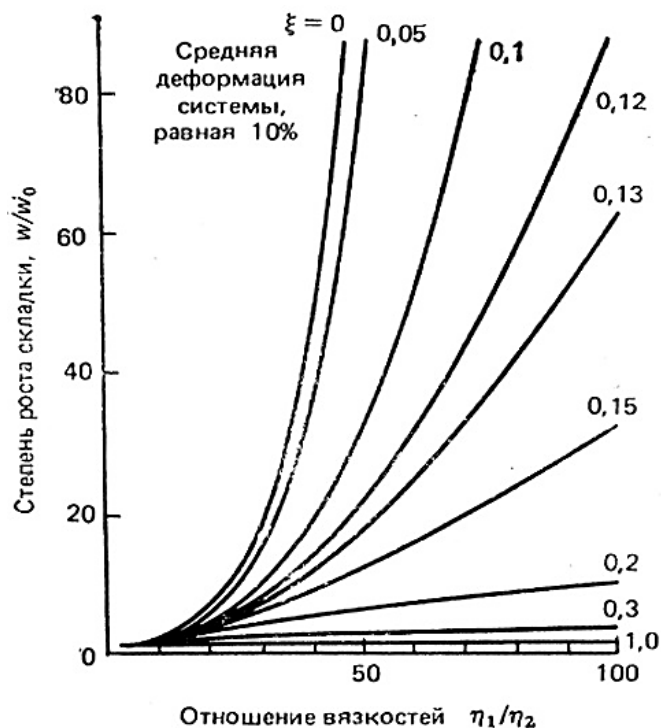
Этот быстрый рост складки соответствует быстрому увеличению члена  $A(\epsilon_s)$ . Последнюю можно одождествлять с высотой крупных структур на регионе ЮКВ, т.е.  $A(\epsilon_s) \approx H_{ct}$ .

Био и Уиллис открыли эмпирическую зависимость; «Чем больше мощность слоя и чем выше его компетентность, тем больше длина волны складки». Это качественно согласуется на примере крупных структур на ЮКВ.

Взаимосвязь между длиной волны складки и толщиной слоя на природных складках впервые была описана количественно Шервином, Чэннлом (1968); Ромбергом и Гошем, Хаара и др. ученые доказали, что отношение длины дуги складки к мощности слоя  $L_d/h$  изменяется в зависимости от сочетания горных пород, слагающих слой, и вмещающих его отложения и, что  $L_d/h$  характеризуется относительно небольшой величиной, в основном не превышающей 10. Доминирующая длины волны складки на определенной стадии её роста может быть легко рассчитана по доминирующей длине дуги [3].

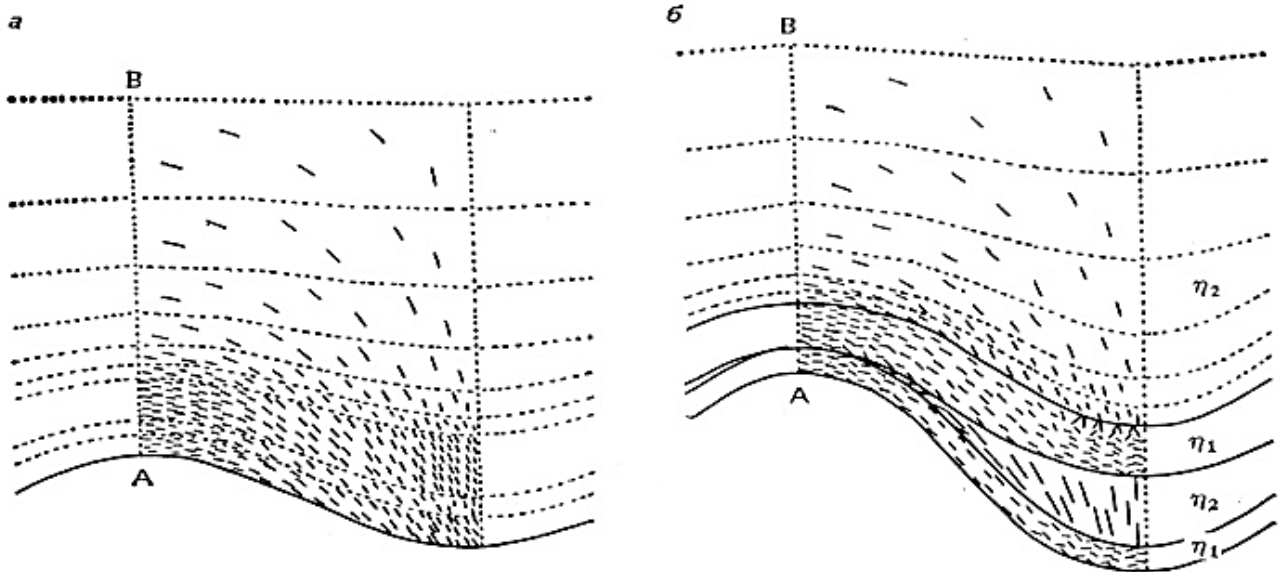
Хаделтон, производя опыты по моделированию, установил, что выбор длины волны прекращается, когда угол между двумя крыльями складки достигает 130–1500.

Решение рассматриваемой выше задачи, применительно к месторождениям ЮКВ, с учетом содержания в коллекторах УВ требует специальных исследований, но значение ее велико для повышения эффективности разведки и разработки этих месторождений [2].



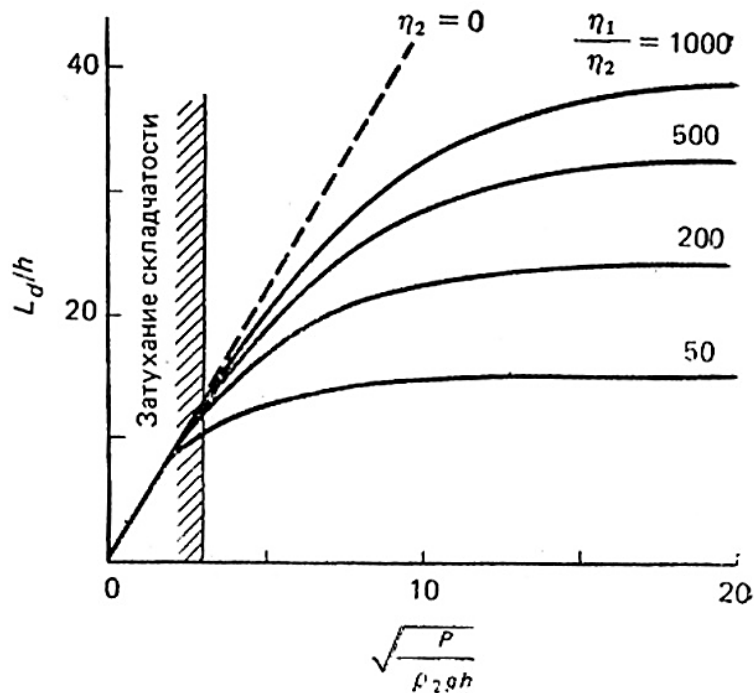
**Рисунок 2** – Процесс роста межслойных складок в слоях равной мощности с переменными коэффициентами вязкости  $\eta_1$  и  $\eta_2$ . На рисунке показана зависимость степени роста складки  $w/w_0$  от отношения вязкостей

$\eta_1 / \eta_2$  для различных значений  $\epsilon_0$  полученных из уравнений (5.2)



**Рисунок 3** – Анализ деформаций вязких складок изгиба методом конечных элементов (по Искеде и Шимамоте). Деформационные картины изображаются ориентациями средней максимального главного удлинения:  
 а) складка изгиба в однородной системе (среднее укорочение между А–Б = 10 %);  
 б) складка изгиба в системе, содержащей два компонентных слоя.

Отношение вязкостей между компонентными слоями и средой  $\eta_1 / \eta_2 = 100$ ; среднее ускорение между А–Б равно 20 %.



**Рисунок 4** – Доминирующие длины волн однослойных складок под действием силы тяжести. По Био. Р – сжимающее напряжение, параллельное слою;  $\eta_1 / \eta_2$  – отношение вязкостей между слоем и средой;  $\rho_2$  – плотность среды, подстилающей компетентный слой

**Тектоническое течение и его характеристики**

Известно, что, при ламинарном течении ньютоновских жидкостей взаимосвязь между скоростью деформации  $\epsilon$  и напряжением  $\tau$  принято за постоянную величину вязкости  $\eta$  и выражается уравнением:  $\epsilon = \tau / \eta$  (при линейном течении) [2].



Сперва представим себе типы напряжений. В поле гидростатического напряжения будут происходить изменения только объемов, без деформации.

Био показал, что вязкие, а не упругие модели будут более реалистичны при моделировании природного складкообразования. Геологические деформации, происходящие в процессе складкообразования, являются пластичными [6]. Эксперименты показали, что, чем больше отношение вязкостей между двумя типами чередующихся слоев или чем меньше значение  $\varepsilon_0$ .  $\varepsilon = L/2H$ , где  $L$  – длина волны складки,  $H$  – толщина складчатого участка. При этом чем больше  $H_0$  по отношению к  $L_0$ , тем быстрее будет расти складка.

#### Влияние силы тяжести на складкообразование

Био, Рамберг и др. изучали теоретически и экспериментально влияние силы тяжести на складкообразование.

Принимая, за основу то, что складки имеют синусиодальную форму, параметр  $P$ , который показывает скорость роста складки, получают по уравнению Био:

$$P = \left( P - \frac{\rho_2 S}{h\ell^2} \right) / \left( \frac{2\eta_2}{h\ell} + \frac{1}{3}\eta_1 h^2 \ell^2 \right). \quad (5)$$

Разница между этим уравнением и уравнением 5.6 состоит во включении члена  $\rho_2 S / h\ell^2$ , связанного с влиянием силы тяжести в правую сторону уравнения. Этот член всегда уменьшает  $P$ , т.е. сила тяжести препятствует росту, складки, то есть отмечается стабилизирующее влияние силы тяжести.

Используя различные значения отношения вязкостей  $\eta_1 / \eta_2$  и безразмерную величину  $P / \rho_2 gh$ , показывающую влияние силы тяжести, можно решать поставленную задачу для  $L_d / h$ .

#### Список литературы:

1. Абасов М.Т. Неклассическая теоретическая модель структурного развития литосферы / М.Т. Абасов, Г.Г. Кулиев, Р.Д. Джеванджир.
2. Бронгулеев В.В. Проблемы складкообразования в Земной коре. – М. : Nedra Publishing House, 1967.
3. Белоусов В.В. Типы происхождения складчатости. «Советская геология». – М., 1958. – № 1.
4. Каграманов К.Н. Методические основы оценки извлечения нефти по геолого-промысловым данным (экспресс-методы) / К.Н. Каграманов, Т.Ю. Багаров. – Баку : «Нафта пресс», 2003.
5. Кулиев Г.Г. Расчет критических сил неустойчивости структурообразования в пределах трехмерной модели / Г.Г. Кулиев, С.М. Касимова.
6. Хаин В.Е. Общая геотектоника. – Из-во «Недра», 1964.

#### List of references:

1. Abasov M.T. Non-classical theoretical model of structural development of lithosphere / M.T. Abasov, G.G. Kuliev, R.D. Dzhevanshir.
2. Bronguleyev V.V. Problems of Folding in the Earth Crust. – M. : Iz-vo «Nedra», 1967.
3. Belousov V.V. Types of origin of folding. «Soviet Geology». – M., 1958. – № 1.
4. Kagramanov K.N. Methodical bases of oil recovery estimation by geological and field data (express-methods) / K.N. Kagramanov, T.Y. Bagarov. – Baku : «Nafta Press», 2003.
5. Kuliev G.G. Calculation of critical forces of instability of structure formation within the limits of three-dimensional model / G.G. Kuliev, S.M. Kasimova.
6. Khain V.E. General Geotectonics. – Nedra Publishing House, 1964.