

Геология нефти и газа

УДК 551.24.02

<https://doi.org/10.26516/2541-9641.2022.4.104>

Экспериментальное исследование связи деформаций осадочного чехла Сибирской платформы в районе Ковыктинского месторождения газоконденсатов с тектоническими процессами на её юго-восточной окраине

С.А. Борняков¹, А.А. Каримова^{1,2}

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

²*Иркутский государственный университет, г. Иркутск, Россия*

Аннотация. Динамические обстановки формирования разрывных систем в осадочном чехле Сибирской платформы в районе Ковыктинского месторождения газоконденсатов, существовавшие в палеозое и кайнозое согласуются с таковыми для её южной окраины, что позволяет говорить об их возможной взаимосвязи с определяющей ролью вторых по отношению к первым. Ковыктинская площадь удалена от южной окраины Сибирской платформы более чем на 100 км. В этой связи наличие обсуждаемой взаимосвязи требует дополнительной аргументации в виде обоснования физической возможности передачи деформаций по осадочному чехлу на такое расстояние от края платформы.

Авторами с соблюдением условий подобия выполнено физическое моделирование геодинамических обстановок С-З сжатия, левостороннего сдвига и Ю-В растяжения, действовавших на южной окраине Сибирской платформы в палеозое, раннем кайнозое и среднем-позднем кайнозое соответственно. Результаты моделирования показали, при определенных граничных условиях экспериментов, деформации могут распространяться от края модели в её внутренние части на большие расстояния только при сжатии и растяжении. В условиях сдвига латеральные размеры области пространственного распространения деформаций в модели всегда меньше наблюдаемых в её природном аналоге. Это свидетельствует о том, что ране-кайнозойская динамическая обстановка левого сдвига в осадочном чехле районе Ковыктинского газоконденсатного месторождения обязана своим происхождением комплексу геодинамических процессов на всех активных окраинах Сибирской платформы.

Ключевые слова: *Сибирская платформа, осадочный чехол, динамические обстановки, физическое моделирование.*

Experimental study of relationship between deformations of a sedimentary cover in the Siberian platform in the area of the Kovykta gas condensate field and tectonic processes on its southeastern edge

S.A. Bornyakov¹, A.A. Karimova^{1,2}

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

²*Irkutsk State University, Irkutsk, Russia*

Abstract. Dynamic settings of the formation of discontinuous systems in a sedimentary cover of the Siberian platform in the area of the Kovykta gas condensate deposit that existed in the Paleozoic and Cenozoic are consistent with those for its southern edge, which allows us to talk about their possible relationship with the determining role of the latter in relation to the former. The Kovykta area is

more than 100 km away from the southern edge of the Siberian platform. In this regard, the presence of the discussed relationship requires additional argumentation in the form of substantiation of the physical possibility of transmitting deformations along the sedimentary cover at such a distance from the edge of the platform.

The authors, in compliance with the conditions of similarity, performed physical modeling of the geodynamic conditions of N-W compression, left-sided shear and S-E tension, which operated on the southern edge of the Siberian platform in the Paleozoic, early Cenozoic and middle-late Cenozoic, respectively. The results of the simulation showed that under certain boundary conditions of the experiments, deformations can propagate from the edge of the model to its inner parts over long distances only under compression and extension. Under conditions of shearing, the lateral dimensions of the area of spatial propagation of deformations in the model are always smaller than those observed in its natural counterpart. This indicates that the Early Cenozoic dynamic environment of the left sheare in the sedimentary cover of the Kovykta gas condensate deposit owes its origin to a complex of geodynamic processes on all active margins of the Siberian platform.

Keywords: *Siberian platform, sedimentary cover, dynamic setting, physical modeling.*

Введение

На примере одной из лицензионных площадей в районе Ковыктинского газоконденсатного месторождения комплексом тектонофизических методов выделена сеть разломных зон и установлены динамические обстановки ее формирования, (Семинский и др., 2018). Установлено, что напряженное состояние осадочного чехла определялось С-З сжатием в палеозое, обстановкой левостороннего сдвига в раннем кайнозое с последующей её сменой на Ю-В растяжение в среднем-позднем кайнозое. Предложенная временная последовательность полей напряжений на исследуемой площади в целом совпадает с известными геодинамическими построениями для Ю-В окраины Сибирской платформы (СП) для палеозоя и кайнозоя (Замараев и др., 1976; Зорин и др., 2009; Саньков и др., 2017; Сизых, 2001; Molnar, Taronnier, 1975; Sankov et. al., 1997). Палеозойское С-З сжатие в её пределах объясняется закрытием палеоокеана с надвиганием на край платформы коллизионного комплекса, а кайнозойские динамические обстановки сдвига и растяжения связываются с разными стадиями Байкальского рифтогенеза. Как известно, в начальную стадию по основным рифтообразующим разломам реализовывались левосторонние сдвиговые смещения, трансформировавшиеся в позже в сбросовые (Шерман, Днепровский, 1989).

Таким образом, динамические обстановки в породах чехла в районе Ковыктинского газоконденсатного месторождения

совпадают с динамическими обстановками, существовавшими на Ю-В окраине Сибирской платформы, что позволяет считать первые генетически связанными со вторыми, не смотря на удаленность обсуждаемых объектов более чем на 100 километров друг от друга.

В механике сплошной среды действующие на неё силы подразделяются на поверхностные и массовые. Первые реализуются в ситуациях, когда деформация выделенного объема тела осуществляется под действием механических сил, приложенных к одной из ограничивающих его поверхностей. Массовые силы (например, гравитационные), в свою очередь, действуют во всем объеме тела повсеместно, приводя к существенным его деформациям при определенных условиях. Действие поверхностных сил, в отличие от массовых, сопровождается постепенной миграцией создаваемых ими напряжений от места их приложения во внутренние части деформируемого объема и, в случае больших масштабов, такая миграция всегда имеет пространственный предел. В свете изложенного, силы, порождаемые тектоническими процессами на южной окраине СП и воздействовавшие на её осадочный чехол относятся к поверхностным силам. В этой связи возникает вопрос, — насколько физически корректна генетическая связь описанных выше напряженных состояний комплекса пород осадочного чехла в пределах Ковыктинской площади с геодинамическими процессами на Ю-В окраине Сибирской платформы, или, другими словами, — находится ли Ковыктинская

площадь в области динамического влияния на осадочный чехол геодинамических процессов на её Ю-В окраине? Под область динамического влияния геодинамических процессов, в данном случае, понимается пространственная область латерального распространения в осадочном чехле платформы разрывных и пликативных деформаций, порождаемых этими процессами.

Поиск ответа на этот вопрос осуществлялся с помощью физического моделирования. Было проведено две серии экспериментов, в которых последовательно решались следующие задачи:

1. Оценить ширину области динамического влияния в осадочном чехле коллизионного шва формирующейся в раннем палеозое Саяно-Байкальской складчатой области.
2. Оценить ширину области динамического влияния в осадочном чехле зон Обручевского и Приморского разломов, при их активизации в раннем Кайнозое в условиях левостороннего сдвига.
3. Оценить ширину области динамического влияния в осадочном чехле зон Обручевского и Приморского разломов, при их активизации в среднем и позднем Кайнозое в условиях растяжения.

1. Методика моделирования

1.1. Условия подобия

Подобие модели и её природного аналога достигается путем определённого подбора соотношений коэффициентов подобия по разным параметрам (Гзовский, 1975). В нашем случае, для определения граничных условий экспериментов, проводимых без учета силы тяжести (в естественном поле силы тяжести), использовался критерий подобия:

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

где η – вязкость, Па·с; ρ – плотность, кг/м³; L – линейные размеры, м; T – время, с.

Исходя из усредненных значений физических и геометрических параметров объекта моделирования, рассчитывались необходимые одноименные параметры моделей. В нашем случае моделировался осадочный чехол, аппроксимируемый однослойной моделью выдержанной мощности. Подобие модели природному объекту достигалось при коэффициентах подобия C_{η} , C_{ρ} , C_L и C_t , равных 10^{16} , 0.5, 10^5 и 10^{10} соответственно. При таких коэффициентах, приняв усредненную вязкость пород осадочного чехла 10^{18-19} Па·с, его мощность 4 км и время действия поля напряжений одного типа 10 млн лет получаем расчетные параметры, — вязкость модели 10^4 Па·с, толщина модели 0.04 м, длительность эксперимента 7200 с (или 2 часа).

1.2. Модельный материал

Выбор модельного материала осуществлялся с учетом упруговязкопластичного поведения горных пород при длительно действующих на них нагрузках (Шерман, 1977). Аналогичные реологические свойства проявляет водная паста монтмориллонитовой глины, правомерность использования которой в качестве модельного материала обоснована специально проведенным исследованием (Семинский, 1986).

1.3. Оборудование

На рисунке 1 приведена схема использованной экспериментальной установки. Модель (1), имитирующая осадочный чехол, располагалась на неподвижном основании (2), имитирующем фундамент платформы. Модель деформировалась подвижным штампом (4) в условиях сжатия (5), левостороннего сдвига (6) или растяжения (7). Проведено две серии экспериментов, отличающиеся степенью сцепления модели с подложкой, регулируемой наличием или отсутствием между ними тонкой прослойки из вазелина (3).

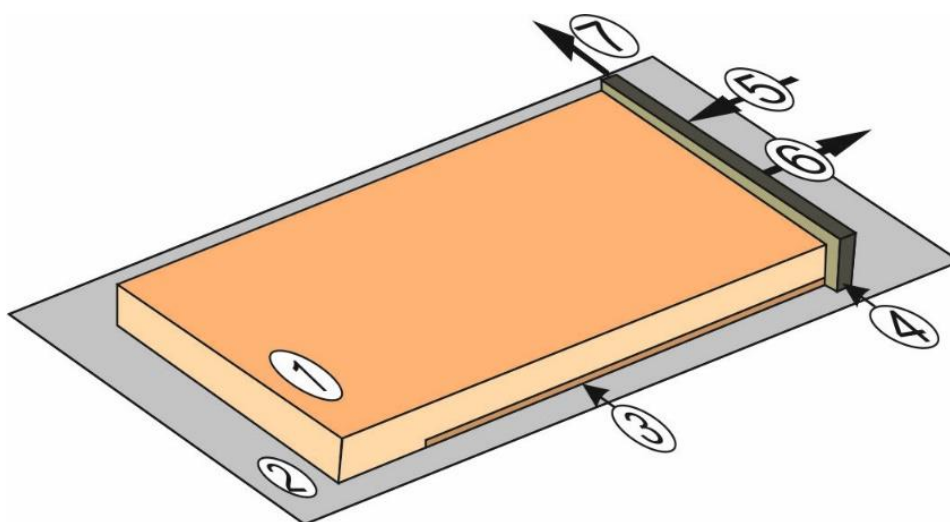


Рис. 1. Схема моделирования.

Условные обозначения: 1 – модель; 2 – неподвижный штамп рабочего стола экспериментальной установки; 3 – прослойка вазелиновой смазки в основании модели; 4 – подвижный штамп горизонтальной установки и направление его движения при сжатии (5), растяжении (6) и сдвиге (7) в модели.

Fig. 1. Modeling scheme.

Symbols: 1 – model; 2 – fixed stamp of the working table of the experimental installation; 3 – vaseline grease layer at the base of the model; 4 – movable stamp of the horizontal installation and the direction of its movement during compression (5), stretching (6) and shift (7) in the model.

2. Результаты моделирования

Из представленных на рисунке 2 результатов моделирования первой серии экспериментов отчетливо видно, что в случае прочного сцепления подошвы модели со штампом, разрывные деформации в совокупности имеют весьма ограниченное пространственное распространение от места приложения нагрузки. При сжатии ширина этой области составляет 15–20 см и 20–25 см при растяжении и 5–7 см при сдвиге, что в пересчете через коэффициент масштабного подобия составляет 15–20 км, 20–25 км и 5–7 км в природном аналоге соответственно.

Ситуация меняется кардинально при снижении силы трения на подошве модели, что

демонстрируют результаты второй серии экспериментов. При сжатии пространственная область разрывообразования существенно расширяется и совпадает с проекцией площади слоя вазелиновой смазки в основании модели, то есть распространяется практически на всю модель (рис. 3А). При этом формируются разные типы разрывных нарушений. Так, разрывы в правой верхней и средней частях модели разрывы представлены системами сопряженных левых и правых сдвигов (рис. 3А, Б, Б', В, В'). Их реализация стала возможной за счет компенсационного выжимания материала модели с отходом ограничивающего её верхнего бокового штампа в направлении указанном стрелками.

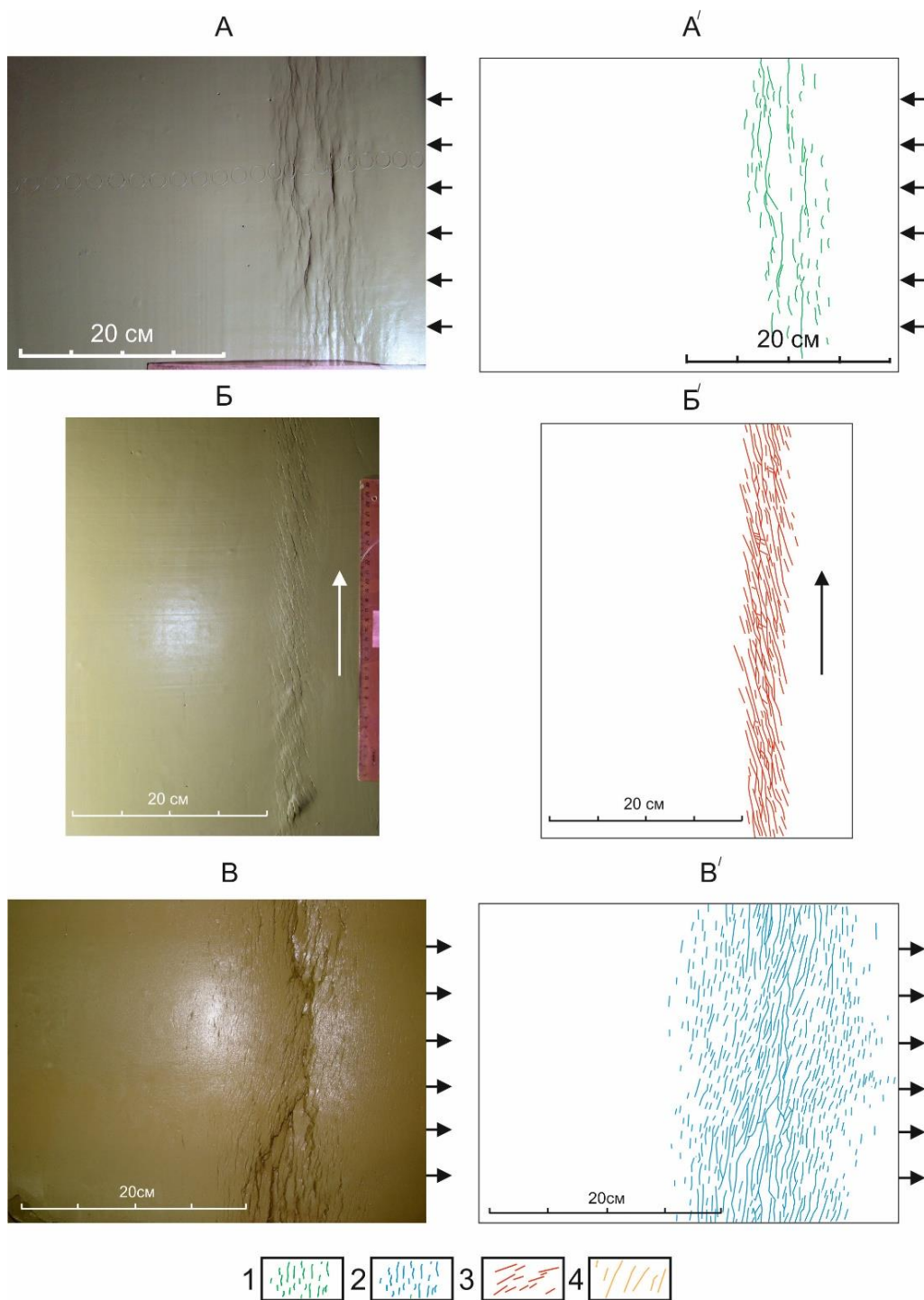


Рис. 2. Основные системы разрывных нарушений, формирующиеся при сжатии, растяжении и сдвиге в моделях первой серии экспериментов (А, Б, В соответственно) и их структурные схемы (А', Б', В' соответственно).

Условные обозначения: 1 – надвиги и взбросы; 2 – сбросы и раздвиги; 3 – левосторонние сдвиги; 4 – правосторонние сдвиги.

Fig. 2. The main systems of discontinuous disturbances formed during compression, tension and shift in the models of the first series of experiments (A, B, C, respectively) and their structural schemes (A', B', C' respectively).

Legend: 1 – uplifts and throws; 2 – resets and extensions; 3 – left-sided shifts; 4 – right-sided shifts.

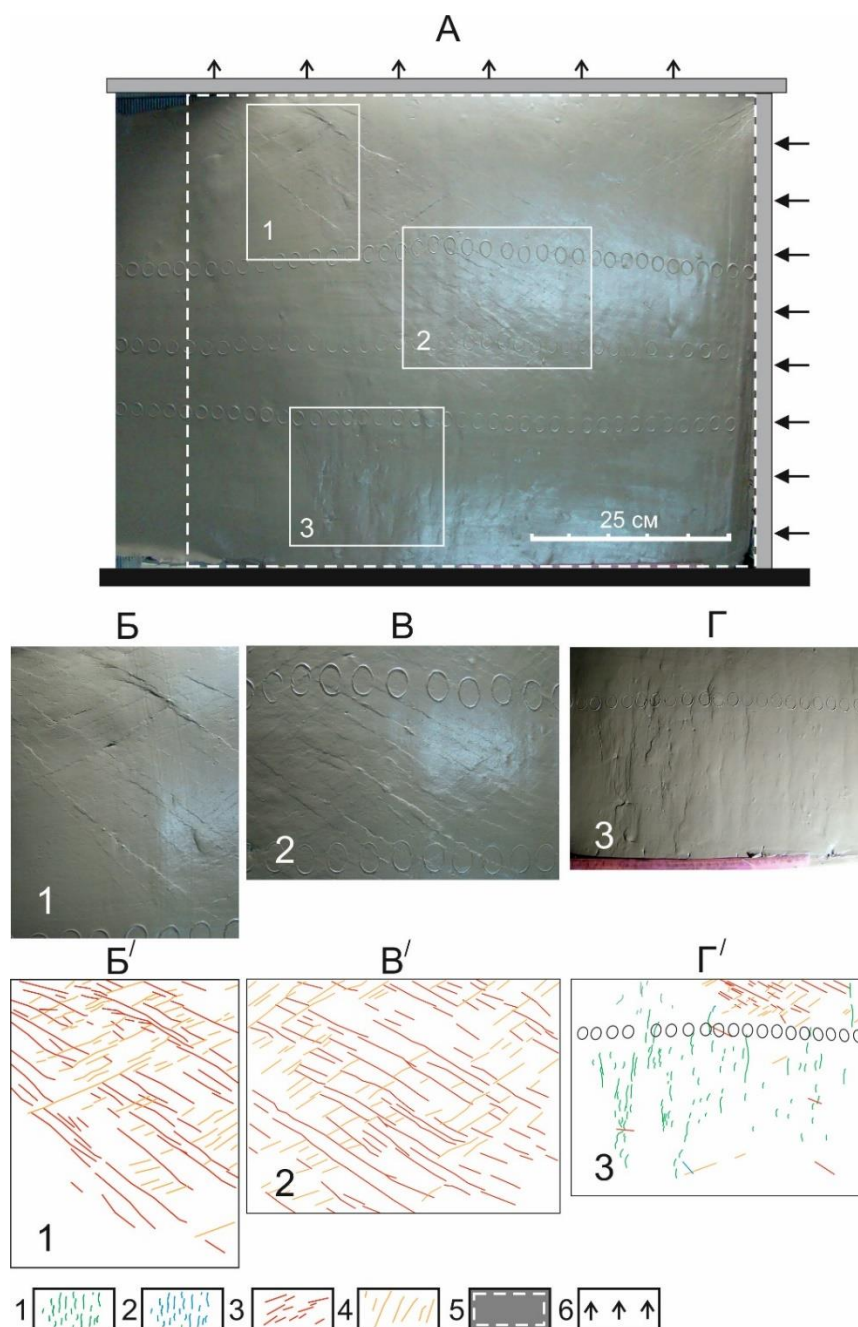


Рис. 3. Основные системы разрывных нарушений и площадь их пространственного распространения в модели при деформации сжатия в рамках второй серии экспериментов. А – общая конечная структурная ситуация в модели и детали её фрагментов в пределах площадок 1, 2, 3 (Б, В, Г); Б', В', Г' – структурные схемы разрывов для фрагментов модели 1, 2 и 3.

Условные обозначения: 1 – надвиги и взбросы; 2 – сбросы и раздвиги; 3 – левосторонние сдвиги; 4 – правосторонние сдвиги; 5 – проекция на поверхности модели контура слоя вазелиновой смазки в её подошве; 6 – направление смещения ограничивающего модель бокового штампа.

Fig. 3. The main systems of discontinuous disturbances and the area of their spatial propagation in the model during compression deformation in the framework of the second series of experiments. А – the general final structural situation in the model and the details of its fragments within sites 1, 2, 3 (B, C, D); Б', В', Г' – structural diagrams of breaks for fragments of model 1, 2 and 3.

Symbols: 1 – uplifts and throws; 2 – drops and extensions; 3 – left-sided shifts; 4 – right-sided shifts; 5 – projection on the surface of the model of the contour of the layer of petroleum jelly grease in its sole; 6 – direction of displacement of the side stamp limiting the model.

Противоположный нижний боковой штамп в процессе эксперимента оставался неподвижным и модельный материал перемещался и деформировался только в направлении действия сжатия. Результатом явилось формирование в этой части модели системы надвигов и взбросов (рис. 3А, Г, Г').

На рисунке 4 приведены результаты моделирования деформации осадочного чеха в условиях растяжения. По сравнению с аналогичным экспериментом из первой серии (рис. 3Б, Б') наблюдается существенное увеличение площади распространения разрывных нарушений, представленных сбросами и

раздвигами. Первые в основном группируются в пределах локализованной линейной грабенообразной структуры растяжения, сформированной в непосредственной близости к месту приложения нагрузки, вторые рассеяны по сей модели в виде непротяженных разрывов (рис. 2А, Б). Таким образом, как и в случае сжатия (рис. 3), наличие слоя малой вязкости в основании модели меняет пространственный предел распространения в ней действующего растяжения, а с ним и масштабы реализации процесса разрывообразования.

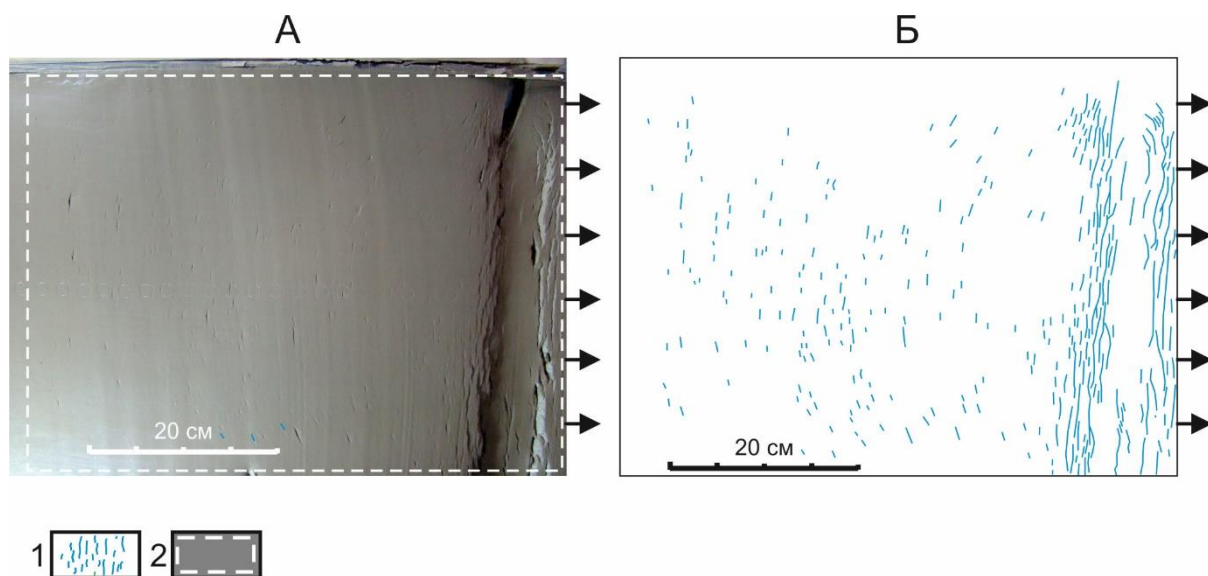


Рис. 4. Основные системы разрывных нарушений и площадь их пространственного распространения в модели при деформации растяжении в рамках второй серии экспериментов (А) и на структурной схеме (Б).

Условные обозначения: 1 – сбросы и раздвиги; 2 – проекция на поверхности модели контура слоя вазелиновой смазки в её подошве.

Fig. 4. The main systems of discontinuous disturbances and the area of their spatial propagation in the model during tensile deformation within the framework of the second series of experiments (A) and on the structural scheme (B).

Symbols: 1 – discharges and extensions; 2 – projection on the surface of the model of the contour of the layer of petroleum jelly grease in its sole.

Несколько иная ситуация проявляется при деформации модели в условиях сдвига (рис. 5). Если при сжатии и растяжении область динамического влияния от приложенной нагрузки распространилась на всю длину модели, то при сдвиге хотя она и кратно

увеличилась до 30–35 см, что в пересчете на природную ситуацию составляет порядка 30–35 км, этого явно недостаточно (рис. 3В, В'; рис. 1).



Рис. 5. Основные системы разрывных нарушений и площадь их пространственного распространения в модели при деформации сдвига в рамках второй серии экспериментов.

Условные обозначения: 1 – сбросы и раздвиги; 2 – левосторонние сдвиги; 3 – правосторонние сдвиги; 4 – проекция на поверхности модели контура слоя вазелиновой смазки в её подошве.

Fig. 5. The main systems of discontinuous disturbances and the area of their spatial propagation in the model during shear deformation in the framework of the second series of experiments.

Symbols: 1 – discharges and extensions; 2 – left-sided shifts; 3 – right-sided shifts; 4 – projection on the surface of the model of the contour of a layer of petroleum jelly grease in its sole.

Обсуждение результатов моделирования

Рассматривая полученные результаты моделирования с позиции поставленных выше задач, можно констатировать, что восстановленные тектонофизическими методами поля напряжений сжатия и растяжения в пределах Ковыктинского лицензионного участка могут быть обусловлены воздействием на осадочный чехол Сибирской платформы одноименных деформаций, имевших место её на Ю-В окраине в раннем палеозое и позднем кайнозое. Полученные структурные ситуации в моделях второй серии экспериментов показывают, что наличие в основании деформируемых моделей тонкой слабовязкой прослойки обеспечивает физическую реальность распространения в них напряжений и деформаций на большие расстояния от места приложения поверхностной нагрузки даже без участия в деформационном процессе подстилающего их «фундамента». В природных условиях роль такой «смазки» могут выполнять слои песчаников,

пропитанные нефтепродуктами (например, песчаники в основании Тыптинской свиты рифея), слои глин, каменной соли или другие слои с естественной исходной малой вязкостью или слои с приобретенной пониженной вязкостью за счет их флюидизации.

Несколько отличная ситуация проявляется при деформации сдвига. В этом случае присутствие такой прослойки хоть расширяет область динамического влияния приложенной нагрузки, но в недостаточной мере, чтобы достичь нужного пространственного эффекта. В этой связи логично предположить, что проявившееся в пределах Ковыктинского лицензионного участка раннекайнозойское сдвиговое поле напряжений обусловлено комплексов геодинамических процессов, имевших место на северной и восточной окраинах СП, в том числе спрединга в Арктике и орогенного процесса в Верхояно-Колымской горной системе (Сим и др., 2018).

Исследование выполнено по проекту «Современная геодинамика, механизмы деформации литосферы и опасные

геологические процессы в Центральной Азии», № FWEF-2021-0009.

Выводы

Для выяснения генетической связи палеозойских и кайнозойских динамических обстановок формирования разрывных систем в осадочном чехле СП в районе Ковыктинского месторождения газоконденсатов с аналогичными обстановками, существовавшими на её южной окраине, авторами выполнено физическое моделирование. В краевых частях упруговязкопластичных моделей, имитирующих осадочный чехол, воспроизведены динамические обстановки С-З сжатия, левостороннего сдвига и Ю-В растяжения и оценены пределы латерального распространения деформаций от места приложения нагрузки к модели в её внутренние части. Результаты моделирования показали, при определенных граничных условиях экспериментов, деформации распространяются по модели на большие расстояния только в условиях сжатия и растяжения. Из полученных экспериментальных результатов следует, что эти динамические обстановки, существовавшие на южной окраине СП в палеозое и позднем кайнозое, могли оказывать прямое влияние на формирование динамических обстановок в её осадочном чехле в районе Ковыктинского месторождения газоконденсатов. В условиях же сдвига пространственное распространение деформаций в модели, в пересчете через коэффициент линейного подобия, всегда меньше расстояния между южной окраиной СП и Ковыктинской площадью. Это свидетельствует о том, что ранне-кайнозойская динамическая обстановка левого сдвига в осадочном чехле районе Ковыктинского газоконденсатного месторождения обязана своим происхождением комплексу геодинамических процессов на всех активных окраинах СП.

Литература

Гзовский М.В. Основы тектонофизики. – М. : Наука, 1975. – 536 с.

Зорин Ю.А., Скляров Е.В., Беличенко В.Г., Мазукабзов А.М. Механизм развития системы островная дуга–задуговой бассейн и геодинамика Саяно-Байкальской складчатой

области в позднем рифее-раннем палеозое // Геология и геофизика, 2009, т. 50, № 3, с. 209–226.

Саньков В.А., Парфеевец А.В., Мирошниченко А.И., Бызов Л.М., Лебедева М.А., Саньков А.В., Добрынина А.А., Коваленко С.Н. Позднекайнозойское разломообразование и напряженное состояние юго-восточной части Сибирской платформы // Геодинамика и тектонофизика. 2017. Т. 8. № 1. С. 81–105. doi:10.5800/GT-2017-8-1-0233.

Семинский К.Ж., Саньков В.А., Огибин В.В., Бурзунова Ю.П., Мирошниченко А.И., Горбунова Е.А., Горлов И.В., Смирнов А.С., Вахромеев А.Г., Буддо И.В. Тектонофизический подход к анализу геолого-геофизических данных на газоконденсатных месторождениях со сложным строением платформенного чехла // Геодинамика и тектонофизика. 2018. Т. 9. № 3. С. 587–627. doi:10.5800/GT-2018-9-3-0364.

Сим Л.А., Гордеев Н.А., Маринин А.В. Новейшая геодинамика восточной окраины Сибирской платформы // Геосистемы переходных зон, 2018, т. 2, № 4, с. 280–289.

Шерман С.И. Физические закономерности развития разломов земной коры. – Новосибирск: Наука. Сиб. Отд-ние, 1977. – 102 с.

Шерман С.И., Днепровский Ю.И. Поля напряжений земной коры и геолого-структурные методы их изучения // Новосибирск: Наука. Сиб. отд-ние. 1989. – 158 с.

Molnar P., Tapponnier P. Cenozoic tectonics of Asia: effects of continental collision // Science. 1975. V.189. P. 419–426.

San'kov V.A., Miroshnichenko A.I., Levi K.G., Lukhnev A., Melnikov A. A & Delvoux Cenozoic stress field evolution in the Baikal Rift Zone, [Evolution du champ de contrainte cenozoique dans le rift du Baikal // 1997, Bull, Centre Rech. Elf. Explor. Prod., 21, 2, 435–455.

Zamaraev S.M., Adamenko O.M., Ryazanov G.V., Kulchitsky A.A., Adamenko R.S., Vikentieva N.M. Structure and History of the Development of the Predbaikalsky foredeep. Nauka, Moscow, 1996. 134 p. (in Russian) [Замараев С.М., Адаменко О.М., Рязанов Г.В., Кульчицкий А.А., Адаменко Р.С.,

Викентьева Н.М. Структура и история развития Предбайкальского предгорного прогиба. М.: Наука, 1976. 134 с.].

Sizykh V.I. Sharyazh-Thrust Tectonics of the Margins of Ancient Platforms. SB RAS

Publishing House, Novosibirsk, 154 p. (in Russian) [Сизых В.И. Шарьяжно-надвиговая тектоника окраин древних платформ. Новосибирск: Изд-во СО РАН, 2001. 154 с.].

Борняков Сергей Александрович,

кандидат геолого-минералогических наук,
664033 Иркутск, ул. Лермонтова, д. 128,
Институт земной коры СО РАН,
ведущий научный сотрудник,
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 Fellow,
email: bonyak@crust.irk.ru.

Каримова Анастасия Алексеевна,

кандидат геолого-минералогических наук,
664003 Иркутск, ул. Ленина, д. 3,
Иркутский государственный университет,
геологический факультет, ст.преподаватель,
664033 Иркутск, ул. Лермонтова, д. 128,
Институт земной коры СО РАН,
младший научный сотрудник,
email: tarasova@crust.irk.ru.

Karimova Anastasiya Alexeevna,

candidate of geological and mineralogical sciences,
664003 Irkutsk, Lenin str., 3,
Irkutsk State University, Faculty of Geology, senior lecturer,
664033 Irkutsk, st. Lermontova, 128,
Institute of the Earth's Crust SB RAS,
Junior Research Fellow,
email: tarasova@crust.irk.ru.