

УДК 551.243.6(470.56)

ГЛУБИННОЕ СТРОЕНИЕ ОРЕНБУРГСКОЙ РАДИАЛЬНО-КОНЦЕНТРИЧЕСКОЙ СТРУКТУРЫ: ЭКСПЕРИМЕНТАЛЬНОЕ МОДЕЛИРОВАНИЕ ПРИ ФЛЮИДОДИНАМИЧЕСКИХ НАГРУЗКАХ И СРАВНИТЕЛЬНЫЙ АНАЛИЗ ОБРАЗЦОВ ПЕСЧАНИКОВ ИЗ ПОРОД НЕФТЯНЫХ МЕСТОРОЖДЕНИЙ ЗАПАДНОЙ СИБИРИ

© 2023 г. Е. А. Данилова*

*Институт геофизики им. Ю.П. Булашевича Уральского отделения Российской академии наук,
ул. Амундсена, д. 100, 620016 Екатеринбург, Россия*

**e-mail: yevgeniya.antoninovna@bk.ru*

Поступила в редакцию 07.10.2022 г.

После доработки 11.01.2023 г.

После повторной доработки 14.02.2023 г.

Принята к публикации 16.02.2023 г.

Проведено исследование глубинного строения Оренбургской радиально-концентрической структуры в фундаменте Русской платформы по сеймотектоническим и геоморфологическим данным. Для этого выполнена интерпретация временных региональных сейсмических профилей, пересекающих структуру, с выделением главных глубинных разломов и замером углов падения. Выявлено, что радиально-концентрическая структура представляет собой крупную цветковую структуру. В ее строении участвуют основные разнонаправленные глубинные нарушения, падающие под углами $\angle 60^{\circ}$ – 85° и ограничивающие в фундаменте зоны горстов или взбросов. Установлено иерархическое строение разломов структуры. Месторождения нефти и газа приурочены к основным глубинным дислокациям Оренбургской структуры и представляют собой морфологические цветковые структуры малых размеров. Выполнено экспериментальное моделирование формирования цветковых структур с использованием данных акустической эмиссионной активности пород и под действием флюидодинамических нагрузок, произведенных на установке УИК-АЭ (ИГ УрО РАН, Россия) на образцах зерна песчаников из пород-коллекторов нефтяных месторождений Западной Сибири. Разработанная модель показала, что образование цветковых структур может происходить без горизонтального сдвига за счет бокового сжатия и глубинного давления. С помощью метода сейсмоакустической эмиссии были зафиксированы характерный шум при образовании трещин в образцах зерна, затихание звука перед раскалыванием и затем его резкое взрывное увеличение от разрыва сплошности породы. Анализ зерна скважин, пробуренных в пределах Оренбургской радиально-концентрической структуры, выявил, что в породах осадочного чехла имеется достаточно много признаков гидротермальных флюидных разгрузок, таких как волнистая (или плейчатая) слоистость, своеобразные текстуры и интервалы брекчий, скорлуповидная форма включений, стиллотитовые швы, флюидалные текстуры. Сделан вывод о том, что генезис Оренбургской радиально-концентрической структуры связан с воздействием глубинных потоков тепла, флюидов, высокого давления и имеет общность со взрывными кольцевыми структурами шитов и платформ.

Ключевые слова: Оренбургская радиально-концентрическая структура, временные сейсмические разрезы, глубинные разломы, цветковая структура, экспериментальное моделирование, взрывные структуры, месторождения нефти и газа, признаки гидротермальных флюидных нагрузок

DOI: 10.31857/S0016853X23020029, EDN: FZHXP

ВВЕДЕНИЕ

В 2021–2022 гг. в фундаменте Русской платформы по сеймотектоническим и геоморфологическим данным автором была выявлена Орен-

бургская радиально-концентрическая структура $\varnothing > 250$ км, генетически связанная с современными геодинамическими процессами в земной коре [9, 10] (рис. 1).

Внутри нее в осадочном чехле закономерно распределены уникальное Оренбургское нефтегазоконденсатное месторождение, более мелкие залежи углеводородов и структуры, выявленные сейсморазведочными работами [10].

Оренбургское месторождение, приуроченное к центру структуры, предположительно стало результатом функционирования главных очагов генерации углеводородов в фундаменте [19]. Вдоль радиальных и концентрических разломов Оренбургской радиально-концентрической структуры, а также в зонах их пересечения, сосредоточены месторождения углеводородного сырья меньшего размера (см. рис. 1).

По этим зонам происходит миграция углеводородов [16, 20, 24, 31, 33, 36, 37, 39, 41]. К образованию месторождений нефти и газа или перераспределению сформировавшихся залежей углеводородов в пределах Оренбургской радиально-концентрической структуры привели неотектонические сдвиговые деформации [1, 33, 34].

Радиально-концентрические структуры связаны с процессами очаговой геодинамики, мантийного диапиризма и вулканизма [4, 15, 16, 20, 24].

В работе В.И. Ваганова и др. [3] на примере Западной Сибири описано образование подобных структур на платформах и щитах, связанное с природными газовыми взрывами. Было показано, как под воздействием глубинных потоков тепла и флюидов в фундаменте под огромным давлением, происходило куполообразование, при котором сначала возникает система конических трещин и начинается подъем диапира, сопровождающийся мощными подземными взрывами, а затем происходит взрыв в центре структуры, при котором образуются система радиальных и кольцевых разломов, конических и наклонных трещин [3]. В строении разломов подобных структур наблюдается иерархия, т.к. при последующих взрывах формируются системы более мелких кольцевых и радиальных разломов, приуроченных к главным тектоническим нарушениям.

Результаты мониторинга современных геотектонических процессов свидетельствуют о том, что сейсмическая активность на древней Русской платформе еще не прекратилась [17]. За последние годы в центре Оренбургской радиально-кон-

центрической структуры, в зонах пересечения радиальных и концентрических разломов зарегистрировано значительное количество эпицентров сейсмических событий [10], поэтому модель Ваганова В.И. и др. [3] вполне может быть применена для объяснения ее природы [28–30, 32, 38, 42–44].

Целью нашей работы является изучение глубинного строения Оренбургской радиально-концентрической структуры, экспериментальное моделирование ее структур и анализ имеющихся и полученных данных, свидетельствующих о связи данной структуры с природными газовыми взрывами.

МЕТОДЫ ИССЛЕДОВАНИЯ

Для изучения глубинного строения выполнена интерпретация временных региональных сейсмических профилей, пересекающих Оренбургскую радиально-концентрическую структуру (см. рис. 1), с выделением главных глубинных разломов, которые можно трассировать из пород фундамента в осадочный чехол, и замером углов падения.

Автором для проведения экспериментального моделирования радиально-концентрических структур были проанализированы результаты исследований акустической эмиссионной активности пород под действием флюидодинамических нагрузок, выполненных в ИГ УрО РАН (г. Екатеринбург, Россия) на установке УИК-АЭ (произведена в ИГ УрО РАН, Россия [12, 14, 25, 26]).

Визуальный анализ признаков гидротермальных флюидных разгрузок в породах производился в соответствии с атласом структур и текстуру флюидно-эксплозивных пород [27] по керну 319 скважин, пройденных бурением в пределах Оренбургской радиально-концентрической структуры.

ГЕОЛОГИЧЕСКОЕ СТРОЕНИЕ ОРЕНБУРГСКОЙ РАДИАЛЬНО- КОНЦЕНТРИЧЕСКОЙ СТРУКТУРЫ

Оренбургская радиально-концентрическая структура, существование которой подтверждается результатами дешифрирования космического снимка [10], большей своей частью приурочена

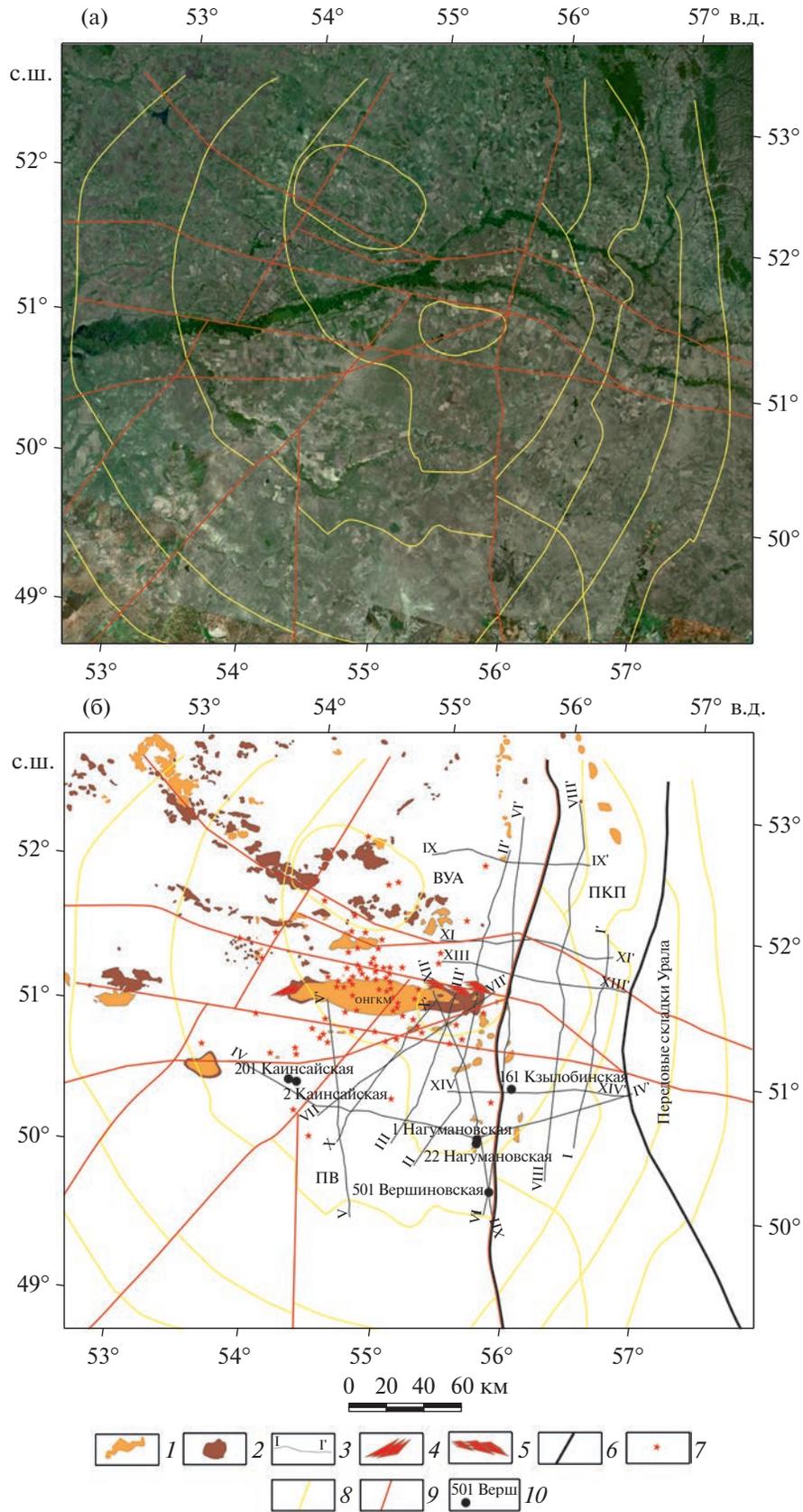
Рис. 1. Геологическая карта Оренбургской радиально-концентрической структуры.

(а) – космический снимок региона, по [45];

(б) – карта-схема региона.

Обозначено: I – Волго-Уральская антеклиза, II – Прикаспийская впадина, III – Предуральский краевой прогиб, IV – передовые складки Урала.

I–2 – месторождения: 1 – газоконденсатные, 2 – нефтяные; 3 – сейсмические профили и их обозначение; 4–5 – геодинамически активный очаг генерации углеводородов: 4 – Западно-Оренбургский, по [19], 5 – Восточно-Оренбургский, по [19]; 6 – границы Предуральского краевого прогиба; 7 – сейсмические события, по [17]; 8 – концентрические разломы Оренбургской радиально-концентрической структуры, по [10]; 9 – главные радиальные разломы Оренбургской радиально-концентрической структуры, с которыми связаны сейсмические события и месторождения нефти и газа; 10 – скважина, ее номер, название площади



к Волго-Уральской антеклизе, на юге переходит в Прикаспийскую впадину, на востоке – в Предуральский краевой прогиб и передовые складки Урала (см. рис. 1).

В строении разреза Оренбургской радиально-концентрической структуры участвуют породы архейско-протерозойского фундамента и нижнеордовикско-четвертичного осадочного чехла.

Предуральский краевой прогиб характеризуется постепенным опусканием фундамента с севера на юг и резким погружением по субмеридиональным разломам от бортовых зон к центральной части, достигая в некоторых местах глубины до 20 км [8].

В районе Волго-Уральской антеклизы и Прикаспийской впадины наблюдается погружение фундамента в южном направлении, глубина залегания составляет от 5 до 14 км. В том же направлении возрастает мощность терригенно-карбонатного осадочного чехла, геологическое строение которого осложнено солянокупольной тектоникой. Протяженные соляные гряды кунгурских отложений вытянуты вдоль бортовых зон Прикаспийской впадины и Предуральского краевого прогиба [9, 10].

На территории Оренбургского месторождения эвапориты образуют субширотные гряды северо-западного простирания, кулисообразно смещающиеся по линиям сдвигов северо-восточной ориентировки [8–10]. Это же направление простирания имеют глубинные разломы, пересекающие Оренбургскую радиально-концентрическую структуру, выявленные при дешифрировании космического снимка [10] (см. рис. 1).

В осадочном чехле юго-запада Оренбургской области открыто большое количество залежей нефти и газа, приуроченных к терригенным и карбонатным пластам-коллекторам отложений девонской, каменноугольной и пермской систем. Нами было установлено, что большая их часть – это неотектонические структуры “цветка” [8].

Вертикальное смещение и значительное опускание фундамента в районе Предуральского краевого прогиба фиксируется геофизическими методами [8]. Контуры Оренбургской радиально-концентрической структуры свидетельствуют о том, что это событие произошло после формирования структуры при незначительном смещении фрагментов кольцевых разломов структуры [10] (см. рис. 1).

МОРФОЛОГИЧЕСКИЕ ОСОБЕННОСТИ СТРУКТУР

По результатам интерпретации временных региональных сейсмических профилей были составлены схематические разрезы, демонстрирующие строение поверхности кристаллического

фундамента, солевых (кунгурских) и подсолевых (верхнепротерозойско-нижнепермских) отложений, а также углы падения основных глубинных разломов, трассирующихся из фундамента в солевые и надсолевые (уфимско-четвертичные) породы (рис. 2).

Установлено, что в центре Оренбургской радиально-концентрической структуры углы падения глубинных разломов составляют от $\angle 60^\circ$ до 85° (см. рис. 1 и 2 профили II–II', III–III', V–V', VII–VII', X–X', XII–XII', XIII–XIII'). Нарушения ограничивают в фундаменте зоны горстов или взбросов, направлены в противоположные стороны, образуя структуру цветка. Аналогичные углы падения глубинных разломов зафиксированы в направлении от центра Оренбургской структуры в сторону Прикаспийской впадины (см. рис. 1; см. рис. 2, профили II–II', III–III', V–V', VII–VII', X–X'). На разрезах, пересекающих Предуральский краевой прогиб, углы падения тектонических нарушений составляют от $\angle 75^\circ$ до 85° , дислокации разнонаправлены (см. рис. 1; см. рис. 2, профили I–I', IV–IV', VIII–VIII', IX–IX', XI–XI', XIV–XIV').

На геологической карте красным цветом мы выделили радиальные разломы Оренбургской радиально-концентрической структуры, выявленные при дешифрировании космического снимка, с которыми связаны сейсмические события и месторождения нефти и газа [10] (см. рис. 1). На схематических разрезах данные разломы также отмечены красным цветом, имеют углы падения от $\angle 60^\circ$ до 90° . Возможно, являясь главными путями миграции углеводородов, именно они повлияли на формирование и перераспределение залежей нефти и газа, а значит, новые месторождения стоит искать в районах их развития.

Если принять во внимание, что месторождения нефти и газа, сосредоточенные в зонах пересечения радиальных и концентрических разломов Оренбургской радиально-концентрической структуры, также представляют собой цветковые структуры, но значительно меньшего размера, с углами падения разломов $\angle 50^\circ$ – 85° [8], то в ее облике мы наблюдаем иерархию разломов, аналогичную строению взрывных кольцевых структур молодых платформ и шитов [3].

ЭКСПЕРИМЕНТАЛЬНОЕ МОДЕЛИРОВАНИЕ ПРОЦЕССА ОБРАЗОВАНИЯ ЦВЕТКОВЫХ СТРУКТУР

Цветковые структуры – это тектонические элементы в земной коре, образование которых связано с деформациями сдвига, сопряженного с боковым сжатием [5, 13, 21, 35]. К ним приурочены месторождения нефти и газа Восточно-Европейской платформы, Предуральского краевого

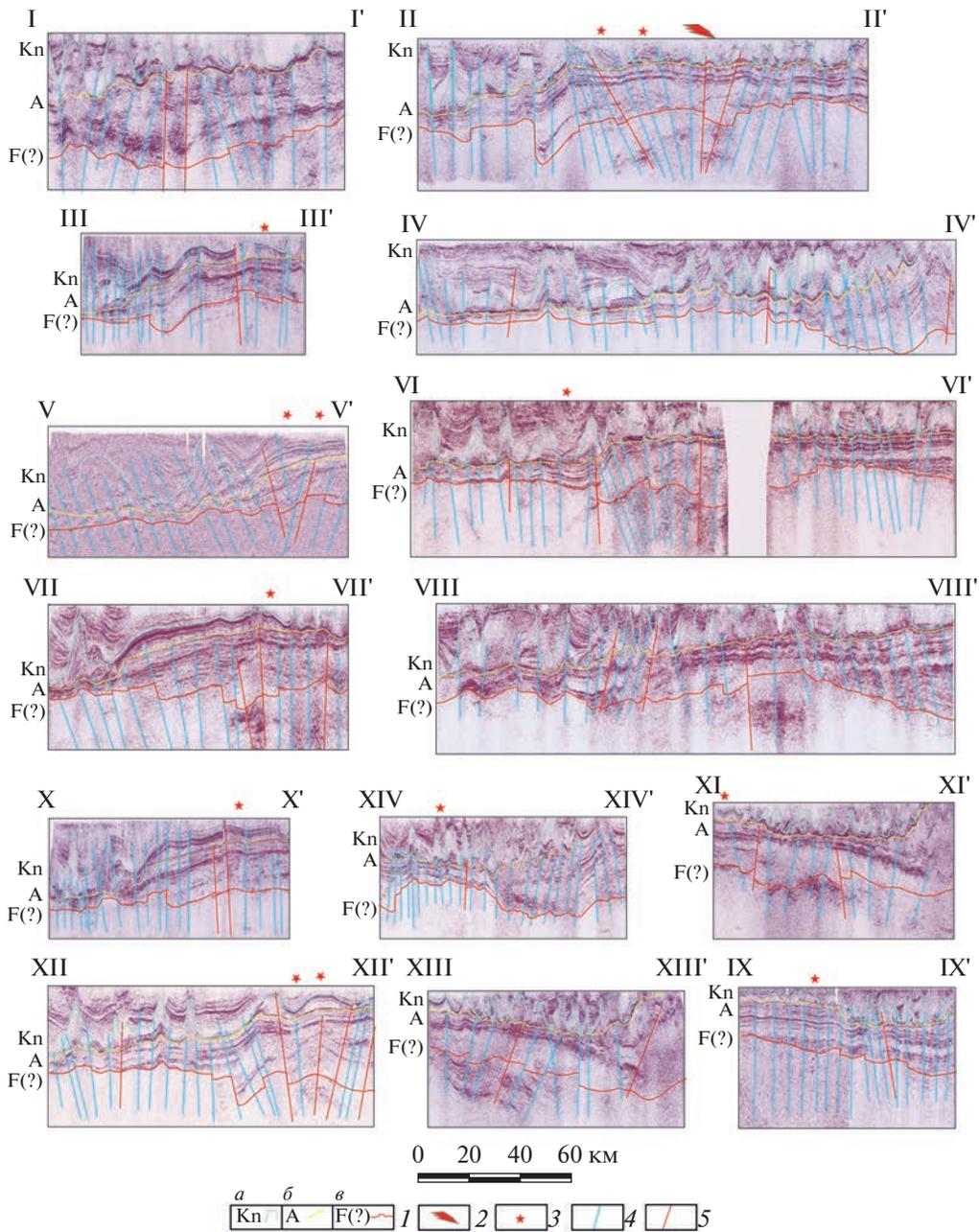


Рис. 2. Схематические временные разрезы.

Обозначены профили:

I-I' – 27072004 (с/п 7/04); II-II' – 09050708 (с/п 5/2007-08); III-III' – 08259902 (с/п 25/1999-02); IV-IV' – 22250102 (с/п 25/1999-02); V-V' – 7a099699 (с/п 9/96-99); VI-VI' – 40052006 (с/п 5/2006-07); VII-VII' – 0709799 (с/п 9/96-99); VIII-VIII' – 41052006 (с/п 5/2006-07); IX-IX' – 370505 (с/п 5/2005); X-X' – 06259902 (с/п 25/1999-02); XI-XI' – 30050607 (с/п 5/2006-07); XII-XII' – 25250102 (с/п 25/01-02); XIII-XIII' – 31050607 (с/п 5/2006-07); XIV-XIV' – 26050102 (с/п 25/01-02).

1 – отражающие поверхности: *a* – кровля пород кунгурского яруса, *b* – кровля подсолевых пород, *v* – кристаллический фундамент; 2 – Восточно-Оренбургский геодинамически активный очаг генерации углеводородов (см. рис. 1); 3 – сейсмические события (см. рис. 1); 4 – выявленные разломы, трассирующиеся из пород фундамента в осадочный чехол; 5 – главные радиальные разломы Оренбургской радиально-концентрической структуры, с которыми связаны сейсмические события и месторождения нефти и газа (см. рис. 1)

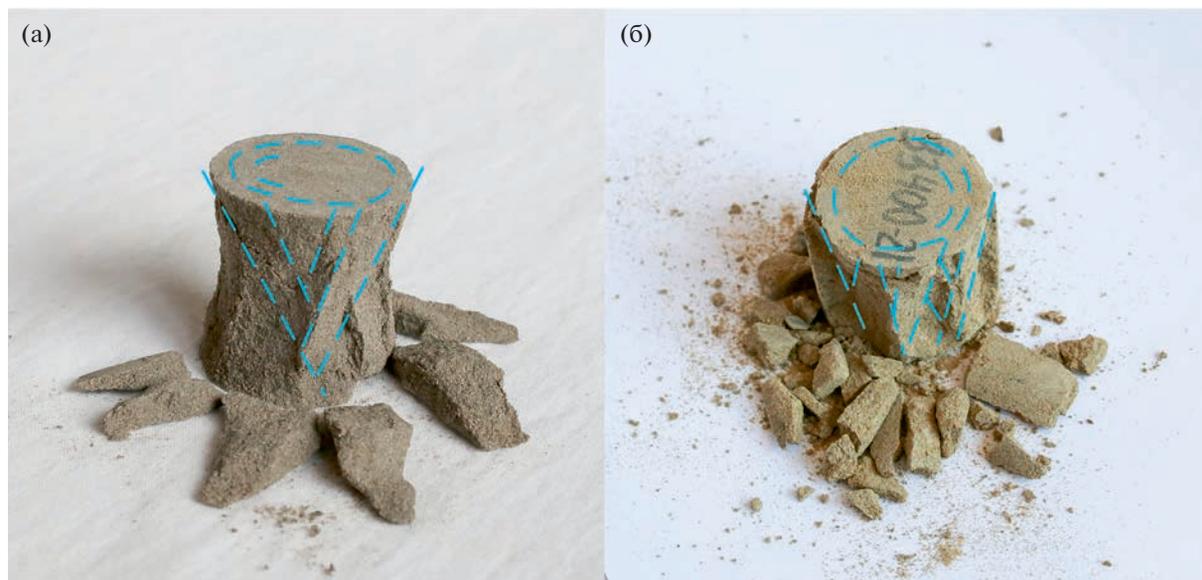


Рис. 3. Экспериментальное моделирование структуры “цветка” на образцах керна во время исследований акустической эмиссионной активности пород под действием флюидодинамических нагрузок, выполненных на установке УИК-АЭ (произведена в ИГ УрО РАН, Россия).

(а) – образец керна, представленный мелкозернистым песчаником, после извлечения из установки;

(б) – образец керна с номером, представленный алевролитовым песчаником, после извлечения из установки. Показано (линии голубым) трещины скола.

прогиба, Западной Сибири, Туркмении [5–8, 21, 35]. Образование структур цветка в сдвиговых зонах ранее было воспроизведено экспериментально и проведено математическое моделирование [13, 18, 23, 40]. Строение структур цветка, по мнению некоторых исследователей, напоминает лопасти пропеллера за счет того, что на разных крыльях сдвига, сместители сбросов падают в противоположные стороны [13].

Нами были проведены исследования керна на установке УИК-АЭ (ИГ УрО РАН, Россия), которые показали, что образование цветковой структуры может происходить без горизонтального сдвига.

При исследовании акустической эмиссионной активности керна в условиях напряжено-деформированного состояния и фильтрации флюида были изучены мелкозернистые и алевролитовые песчаники различной пористости и проницаемости из пород-коллекторов нефтяных месторождений Западной Сибири [11, 12, 14, 25, 26]. Создание напряженного состояния в образцах на установке обеспечивалось за счет гидростатического обжатия керна, имитирующего пластовое давление, и осевого сжатия, направленного снизу-вверх, воспроизводящего глубинное давление. Отмечаются общие закономерности разрушения образцов (рис. 3):

– образцы раскололись до конусообразной формы, с круглым сечением сверху;

– отколовшиеся части образцов имели строе- ние лопастей пропеллера с изогнутой винтовой формой;

– сколы образовывали трещины, падающие под углами $\angle 60^{\circ}–80^{\circ}$ и совпадающие с углами падения разломов “цветковых” структур.

В плане разрушенные образцы керна имели кольцевые трещины в верхней части конуса (см. рис. 3). С помощью метода сейсмоакустической эмиссии были зафиксированы характерный шум при образовании трещин, затихание звуков перед раскалыванием образца и затем резкое увеличение взрывных шумов от разрыва сплошности породы [12].

ПРИЗНАКИ ГИДРОТЕРМАЛЬНОЙ РАЗГРУЗКИ В ПОРОДАХ

В породах осадочного чехла Оренбургской радиально-концентрической структуры значительную роль играют трещиноватость и вторичные процессы [8]. Протекающие гидротермальные процессы в тектонически ослабленных зонах подтверждают широко развитые здесь вторичная пористость и кавернозность [2]. Каверны выполнены кристаллическим кальцитом и доломитом. Повсеместно отмечаются интервалы, содержащие включения пирита. По трещинам развита кальцитизация, ангидритизация, доломитизация, сульфатизация и битуминозность [8].

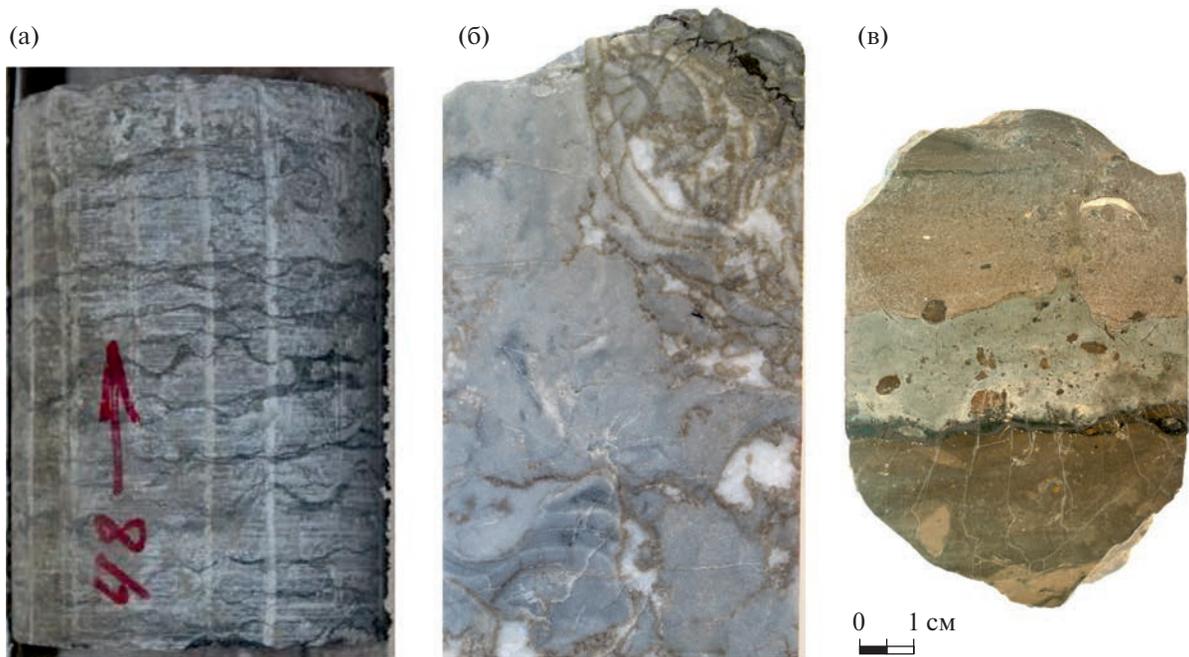


Рис. 4. Признаки воздействия флюидных разгрузок в подсолевых породах Оренбургской радиально-концентрической структуры.

(а) – доломит ангидритовый светло-серый плотный с волнистой слоистостью, подчеркнутой глинистым материалом (скв. 2 Каинсайская, D_3fm , глубина 6172 м);

(б) – доломит вторичный тонкозернистый серый с узорчатой текстурой, с инкрустационными полостями удлиненной формы, выполненными белым крупнокристаллическим доломитом (скв. 501 Вершиновская, D_1vz-kv , глубина 6702 м);

(в) – контакт брекчиевидного известняка и глинистого брекчированного прослоя (скв. 161 Кзылобинская, P_1a , глубина 5012 м).

Положение скважин – см. рис. 1.

На образце (а): цифры (номер образца), стрелка (обозначает верх и низ).

Есть мнение, что метаморфические процессы в породах осадочного чехла Русской платформы осуществляются за счет гидротермальных вод и глубинных рассолов, которые в эпохи тектонической активности мигрируют по проницаемым зонам и разломам из фундамента [22]. Мы провели визуальный анализ керн пробуренных в пределах Оренбургской радиально-концентрической структуры скважин на наличие признаков разгрузки гидротермальных флюидов в отложениях осадочного чехла.

Проведенное нами исследование показало, что самые значительные преобразования под воздействием флюидов в подсолевых отложениях претерпели карбонатные породы, преимущественно доломиты. В данных породах часто встречаются волнистая или, так называемая, плейчатая слоистость, своеобразные текстуры и интервалы брекчий, подобные структурам и текстурам флюидно-эксплозивных пород [27] (рис. 4, а, б).

В карбонатах и аргиллитах подсолевых отложений отмечаются светлые скорлуповидные включения, характерные для структур флюидных потоков [27] (см. рис. 4, в). Встречаются брекчии с примесью битуминозно-глинистого материала,

стилотитовыми швами, включениями и пятнами удлиненно-округлой формы, ориентированными, вероятно, в направлении флюидного потока [27] (см. рис. 4, в). Отмечаются вертикальные контакты темных и светлых доломитов, известняков и доломитов.

В солевых отложениях, как и в подсолевых, под воздействием флюидов карбонаты претерпели заметные преобразования (рис. 5).

В солевых отложениях находятся столбчато-зубчатые стилолитовые швы, волнистые и флюидальные текстуры, а также происходило брекчирование, перемешивание ангидритов, карбонатов и битуминозно-глинистого материала [27] (см. рис. 5, а–в).

В керне надсолевых отложений Оренбургской радиально-концентрической структуры также обнаруживаются флюидальные текстуры [10] (рис. 6, а).

Отмечены вертикальные контакты солей и ангидритов, ожежененных и нежежененных песчаников (см. рис. 6, б, в).

Соляные купола и гряды являются самыми значимыми результатами поступления гидротермальных флюидов по глубинным разломам в

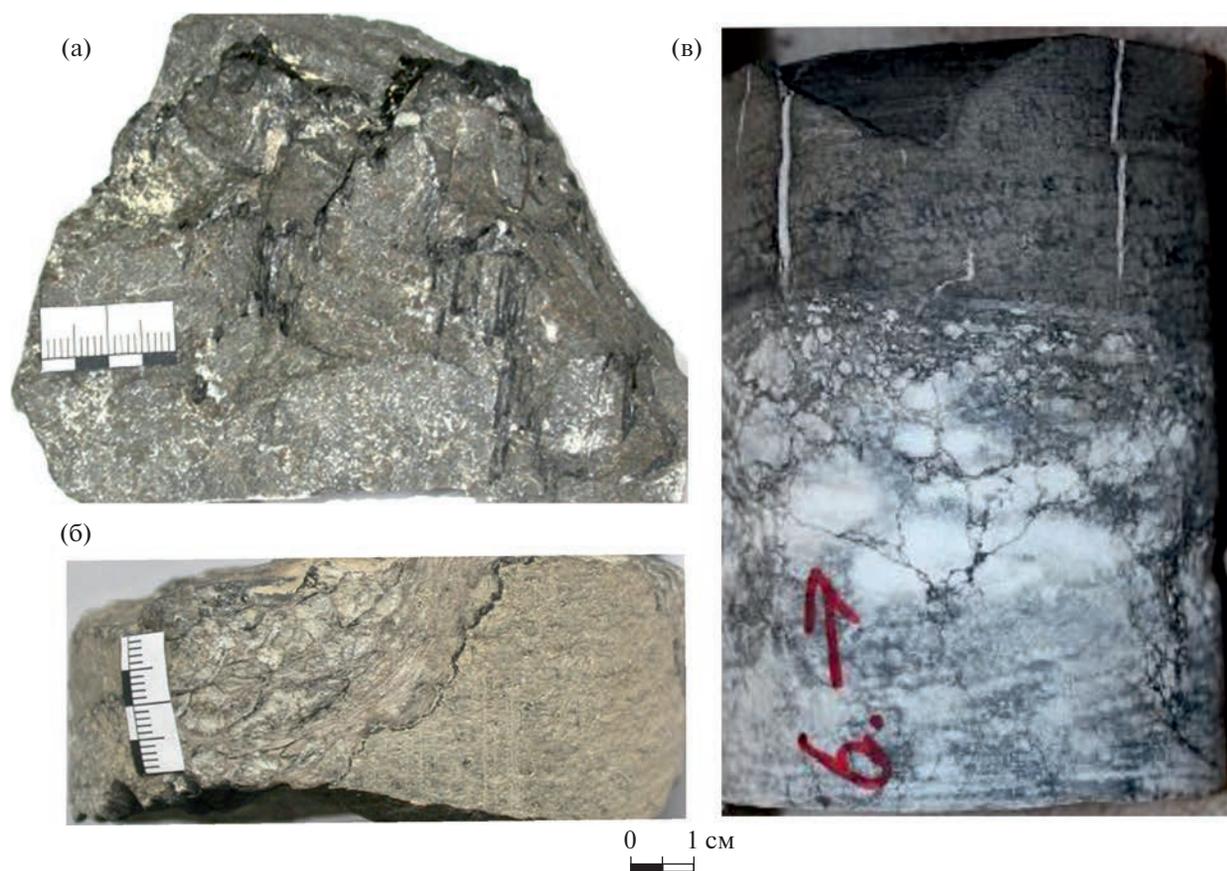


Рис. 5. Признаки воздействия флюидных разгрузок в солевых породах Оренбургской радиально-концентрической структуры.

(а) – столбчато-зубчатые стилолитовые швы в известняке (св. 22 Нагумановская, P_1k , глубина 4160 м);

(б) – прослой брекчированной сульфатной породы, ограниченный битумными стилолитами (св. 22 Нагумановская, P_1k , глубина 4167 м);

(в) – контакт белого ангидрита мелкокристаллического и серого пелитоморфного доломита (св. 2 Каинсайская, P_1k , глубина 5000 м).

На образце (в): цифры (номер образца), стрелка (обозначает верх и низ).

Положение скважин – см. рис. 1.

осадочные породы [6, 7]. Соли пластичны, имеют свойство текучести и способны заполнять полости. В их керне сложно зафиксировать следы флюидодинамики, но образование соляных диапиров имеет много общего с процессом образования радиально-концентрических структур на молодых платформах и щитах, т.к. они также связаны с воздействием глубинных потоков тепла, флюидов и значительным давлением [3].

ОБСУЖДЕНИЕ РЕЗУЛЬТАТОВ И ДИСКУССИЯ

По сейсмическим данным временных региональных сейсмических профилей нами было изучено глубинное строение Оренбургской радиально-концентрической структуры древней Русской платформы. Исследования показали, что структура представляет собой крупную цветковую структуру. В ее центре трассированы основные

глубинные нарушения, падающие под углами $\angle 60^\circ-85^\circ$ и ограничивающие в фундаменте зоны горстов или взбросов. Также в облике структуры выявлена иерархия разломов за счет наличия цветочных структур малых размеров в виде месторождений нефти и газа, приуроченных к основным глубинным дислокациям.

Подобное строение по данным В.И. Ваганова и др. [3] имеют некоторые радиально-концентрические структуры молодой Западно-Сибирской платформы. Это может означать, что сформировались они в результате похожего геотектонического процесса, который не прекратился до настоящего времени. Высокая сейсмическая активность в Южном Предуралье (57 случаев за период с 2009–2016 гг.) указывает на то, что в земной коре формируются зоны напряженно-деформационного состояния [17]. В осадочном чехле это происходит не без участия техногенных

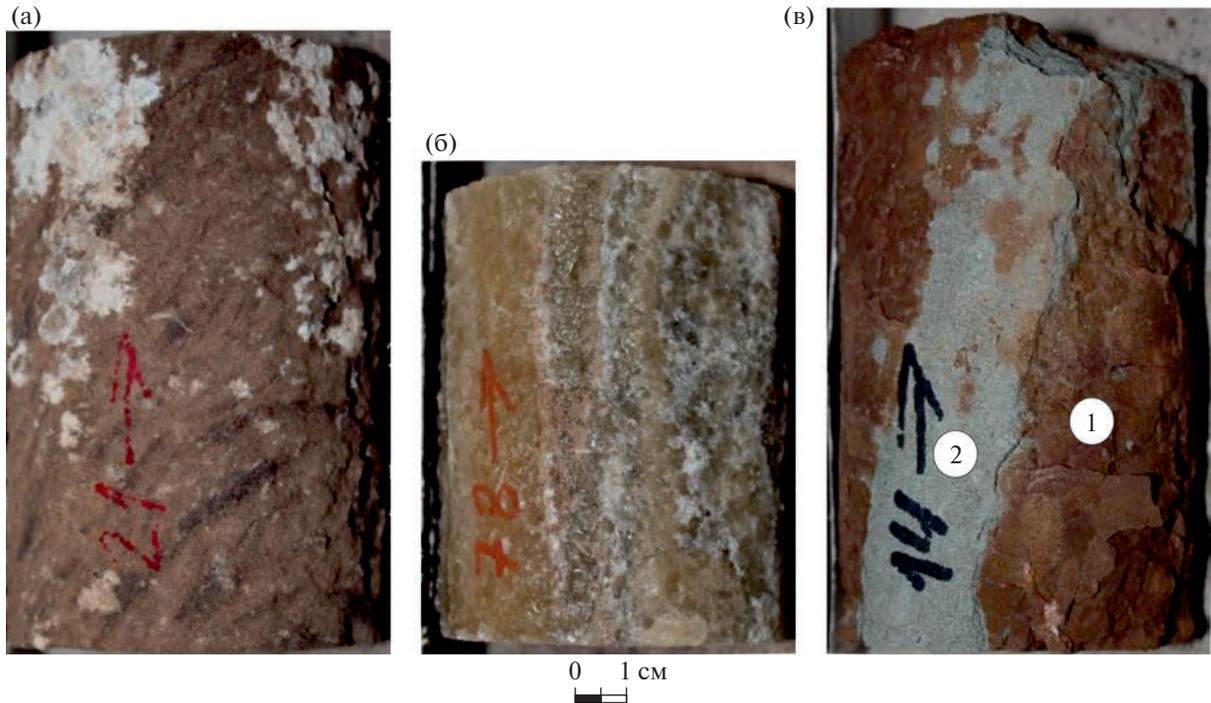


Рис. 6. Признаки воздействия флюидных разгрузок в надсолевых породах Оренбургской радиально-концентрической структуры.

(а) – песчаник темно-коричневый с прослоями алевролита коричневого и с вкраплениями каменной соли (скв. 1 Нагумановская, P_2kz , глубина 1501 м);

(б) – вертикальный контакт соли слабо буроватого цвета крупнокристаллической плотной с ангидритом серым мелкокристаллическим (скв. 1 Нагумановская, P_{1u} , глубина 3005 м);

(в) – вертикальный контакт песчаника мелко-среднезернистого, слабоуплотненного без ясно выраженной слоистости красновато-серого цвета (скв. 201 Каинсайская, Т, глубина 1140 м).

На образцах (а)–(в): цифры (номер образца), стрелка (обозначает верх и низ).

На (в) обозначен (цифры в кружках) вертикальный контакт песчаника: 1 – с ожелезнением, 2 – без ожелезнения.

Положение скважин – см. рис. 1.

факторов на разрабатываемых месторождениях нефти и газа.

Но по мнению М.Ю. Нестеренко и др. [17] подобные зоны формируются также и в кристаллическом фундаменте, что сложно связать только лишь с техногенными процессами. Повышенная сейсмическая активность фиксируется и за пределами месторождений, также отмечается группированность новейших сейсмических событий и приуроченность их к зонам глубинных разломов Южного Предуралья.

Концентрические разломы Оренбургской структуры во многом совпадают с основными направлениями локальных магнитных аномалий юго-запада Оренбуржья, как и тектонические нарушения выявленных радиально-концентрических структур [10] (рис. 7). Локальные аномалии силы тяжести в районе исследования отражают строение соляных гряд и куполов (рис. 8). Неотектонические нарушения Оренбургской радиально-концентрической структуры ограничивают группы соляных структур со схожими элементами простираения, подчеркивая блоковое ее строение.

Изучение строения и нефтегазоносности цветковых структур, связанных с деформациями сдвига, в России началось с месторождений углеводородов Западной Сибири [5, 13, 21, 35]. Анализ полученных данных по исследованию акустической эмиссионной активности терригенных пород-коллекторов нефтяных месторождений региона Западной Сибири под действием флюиодинамических нагрузок, выполненных на установке УИК-АЭ (ИГ УрО РАН, Россия), показал, что образование цветковых структур может происходить без горизонтального сдвига за счет бокового сжатия и глубинного давления.

Мощный осадочный чехол древней Русской платформы слагают терригенные и карбонатные породы различной твердости и плотности. Но в его разрезе также присутствуют цветковые структуры [6–9]. Поэтому, полученные экспериментальные данные по Западной Сибири, на наш взгляд, вполне можно сопоставить с образованием аналогичных цветковых структур в породах Оренбургской радиально-концентрической структуры.

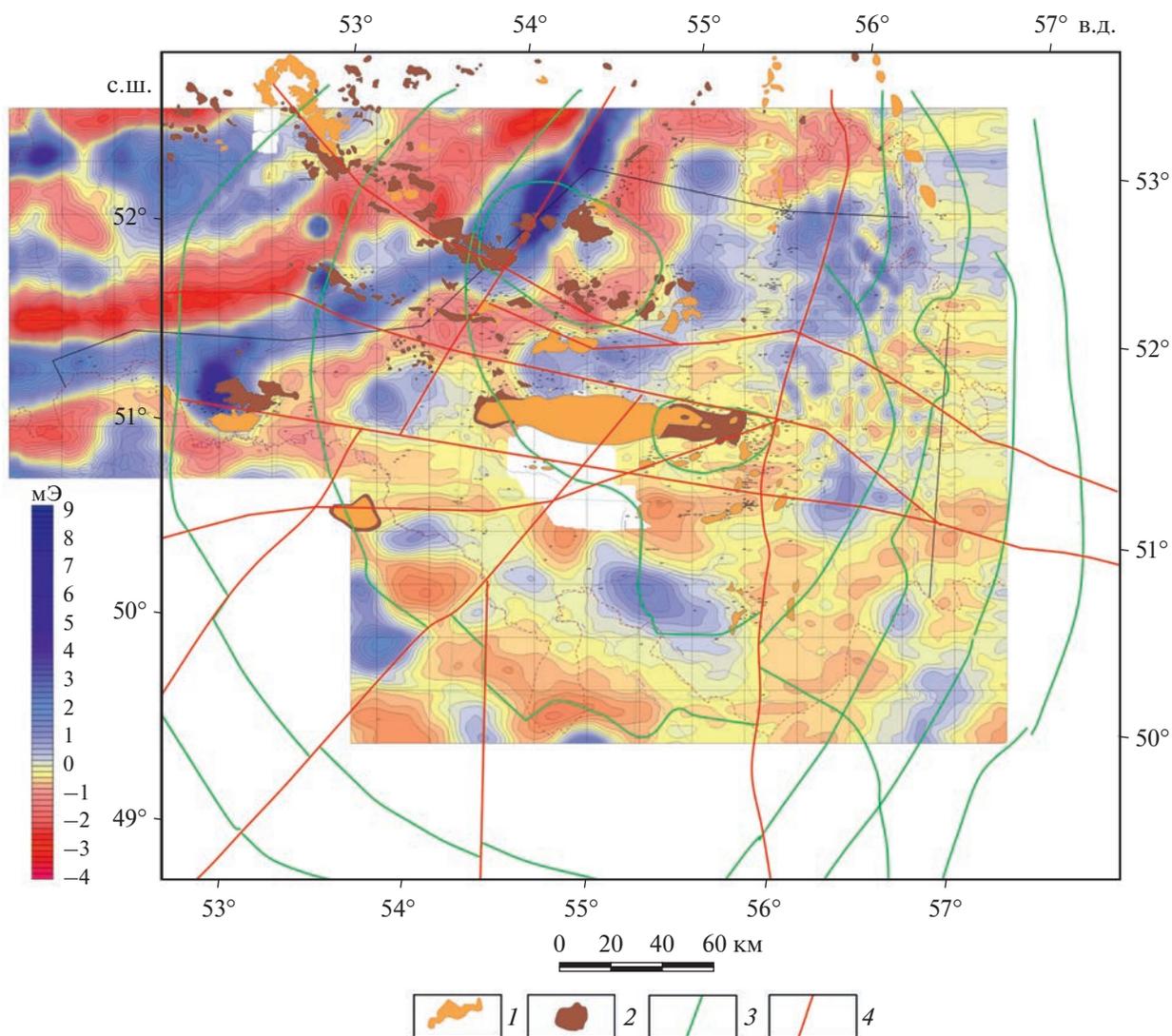


Рис. 7. Сопоставление контуров Оренбургской радиально-концентрической структуры, месторождений углеводородов и карты локальных аномалий магнитного поля
 1–2 – месторождения: 1 – газоконденсатные, 2 – нефтяные; 3 – концентрические разломы Оренбургской радиально-концентрической структуры, по [10]; 4 – главные радиальные разломы Оренбургской радиально-концентрической структуры, с которыми связаны сейсмические события и месторождения нефти и газа

На плотно сцементированных мелкозернистых и алевроитовых песчаниках мы отчетливо увидели особенности растрескивания образцов. Все они раскололись до конусообразной формы, с круглым сечением сверху, где трещины имели кольцевое строение. Отколовшиеся части ядра схожи по форме с лопастями пропеллера и имеют изогнутую винтовую форму. Трещины сколов падают под углами $\angle 60^{\circ}–80^{\circ}$, что совпадает с падением разломов цветковых структур.

При образовании трещин в образцах ядра зафиксирован сейсмоакустический шум, затихание звуков перед раскалыванием и затем резкое уве-

личение шумов от разрыва сплошности породы, как при взрыве.

Анализ ядра скважин, пробуренных в пределах Оренбургской радиально-концентрической структуры, выявил, что в породах осадочного чехла имеется достаточно много признаков гидротермальных флюидных разгрузок:

- волнистая (или пloyчатая) слоистость;
- своеобразные текстуры и интервалы брекчий;
- скорлуповидная форма включений;
- стиллотитовые швы;
- флюидальные текстуры.

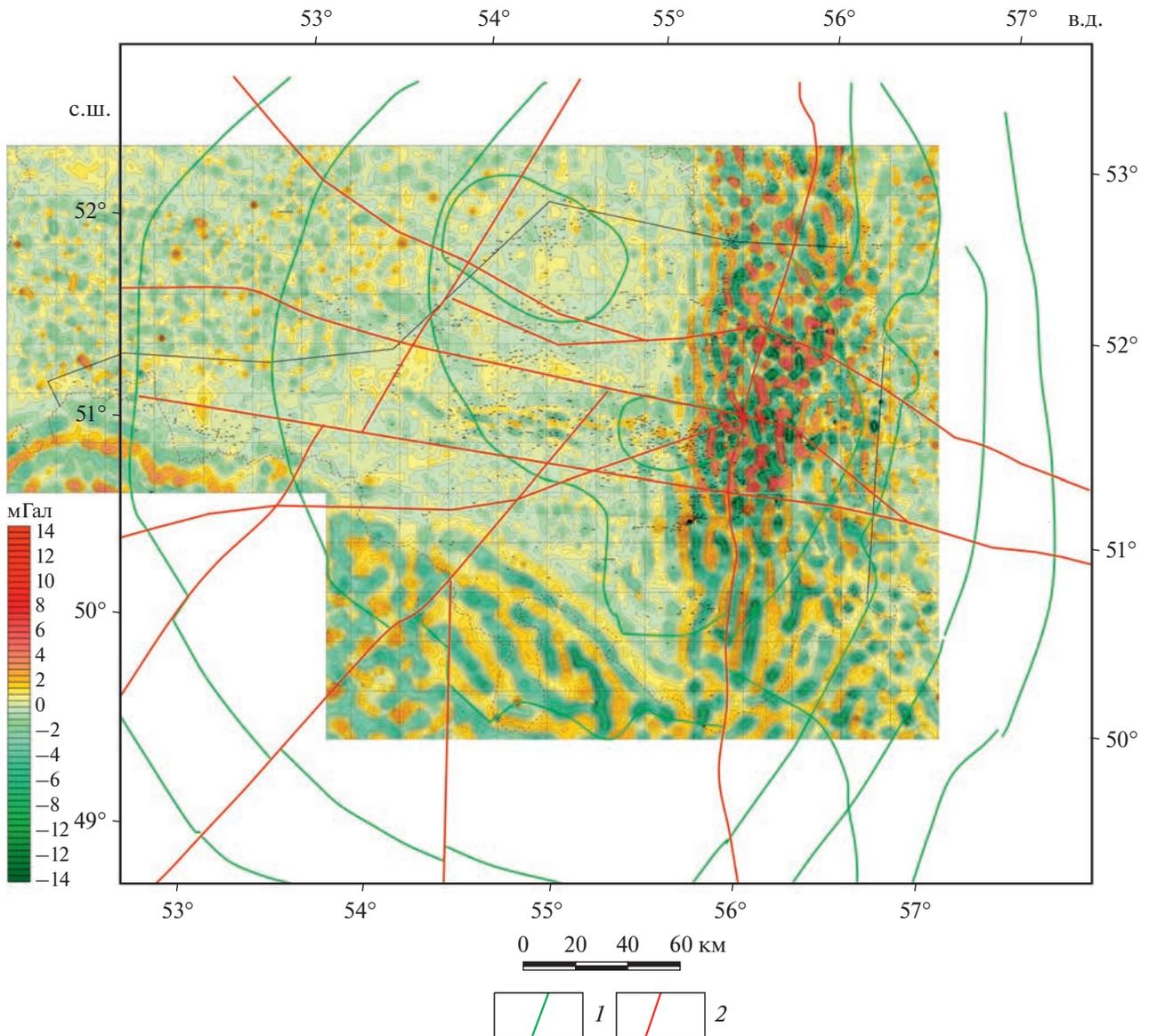


Рис. 8. Сопоставление контуров Оренбургской радиально-концентрической структуры и карты аномалий силы тяжести. 1 – некоторые концентрические разломы Оренбургской радиально-концентрической структуры, по [10]; 2 – главные радиальные разломы Оренбургской радиально-концентрической структуры, с которыми связаны сейсмические события и месторождения нефти и газа

Приведенные данные свидетельствуют о том, что генезис Оренбургской радиально-концентрической структуры связан с воздействием глубинных потоков тепла, флюидов, большого давления и имеет много общего со взрывными кольцевыми структурами щитов и платформ.

ВЫВОДЫ

В результате проведенного исследования сделаны следующие выводы.

1. По сейсмическим данным временных региональных профилей нами было изучено глубинное строение Оренбургской радиально-концентрической структуры. Выявлено иерархичное строение ее разломов. Оренбургская радиально-концентрическая структура представляет собой крупную цветочную структуру, в которую вложены структуры “цветка” малых размеров.

2. Экспериментальное моделирование Оренбургской радиально-концентрической структуры показало, что она образовалась за счет бокового

сжатия и глубинного давления без горизонтального сдвига.

3. В породах осадочного чехла Оренбургской радиально-концентрической структуры происходили гидротермальные флюидные разгрузки.

4. Оренбургская радиально-концентрическая структура генетически связана со структурами взрыва платформ и щитов.

Благодарности. Автор выражает благодарность ООО “Газпром добыча Оренбург” (г. Оренбург, Россия) за предоставленные материалы. Автор признательна В.В. Дрягину (ИГ УрО РАН, Екатеринбург, Россия) за ценные советы и обсуждение.

Автор благодарна рецензенту проф. В.И. Попкову (КубГУ, г. Краснодар, Россия) и анонимным рецензентам за конструктивные комментарии и редактору М.Н. Шуплецовой (ГИН РАН, г. Москва, Россия) за тщательное редактирование.

Финансирование. Исследования выполнены в рамках темы № 1021052504590-8-1.5.4 государственного задания ИГ УрО РАН.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Агибалов А.О., Зайцев В.А., Мануилова Е.А., Мошкин И.В., Сенцов А.А. О влиянии неотектонических движений на особенности локализации месторождений нефти и газа Волго-Уральской антеклизы // *Динамическая геология*. 2020. № 2. С. 125–137. <http://www.geodisaster.ru/index.php?page=soderzhanie-nomera-2-za-2020god>
2. Багдасарова М.В. Роль гидротермальных процессов при формировании коллекторов нефти и газа // *Геология нефти и газа*. 1997. № 9. С. 42–46.
3. Ваганов В.И., Иванкин П.Ф., Кропоткин П.Н. и др. Взрывные кольцевые структуры щитов и платформ. – Под ред. Е.К. Семилетковой – М.: Недра, 1985. 200 с.
4. Волчкова Г.И., Лукина Н.В., Макаров В.И. и др. Космическая информация в геологии. – Под ред. В.Г. Трифонова – М.: Наука, 1983. 534 с.
5. Гогоненков Г.Н., Кашик А.С., Тимурзиев А.И. Горизонтальные сдвиги фундамента Западной Сибири // *Геология нефти и газа*. 2007. № 3. С. 3–11.
6. Горожанин В.М. Особенности нефтегазонакопления в солянокупольных областях юго-востока Восточно-Европейской платформы. – В сб.: *Современное состояние наук о Земле* – Мат-лы междунар. конф. памяти В. Е. Хаина, (МГУ им. М.В. Ломоносова, Москва, 01–04 февр. 2011 г., [Электронный ресурс]) – Режим доступа: <http://khain2011.web.ru> (дата обращения 19.01.2020).
7. Горожанин Е.Н., Горожанин В.М. Строение и перспективы нефтегазонасыщенности зоны передовых складок Южного Урала. – В кн.: *Генезис, миграция и формирование месторождений углеводородного сырья в контексте их поиска, разведки и разработки*. – Под ред. А.В. Колонийца – Мат-лы всероссийской научно-практ. конф. 26–28 сентября 2018, г. Оренбург – (Оренбург: Агентство Пресса, 2018), С. 21–25.
8. Данилова Е.А. Присдвиговые цветковые структуры юго-запада Оренбургской области // *Региональная геология и металлогения*. 2020. Т. 82. С. 60–68.
9. Данилова Е.А. Соляные структуры осадочного чехла Русской платформы как отражение возможных геодинамически активных очагов генерации углеводородов в фундаменте (на примере Оренбургской области) // *Геология и геофизика юга России*. 2021. Т. 11. № 3. С. 33–44.
10. Данилова Е.А. Радиально-концентрические структуры в фундаменте древней платформы и условия возникновения очагов генерации углеводородов: реконструкция по сеймотектоническим данным // *Геотектоника*. 2022. № 3. С. 36–49.
11. Дрягин В.В. Сейсмоакустическая эмиссия нефтепродуктивного пласта // *Акустический журнал*. 2013. Т. 59. № 6. С. 744–751.
12. Иголкина Г.В., Дрягин В.В., Мезенина З.С., Иванов Д.Б. К вопросу об анализе акустических эмиссионных процессов пластов-коллекторов. – В сб. *Глубинное строение, геодинамика, тепловое поле Земли, интерпретация геофизических полей*. – Под ред. П.С. Мартышко – Мат-лы всерос. конф. с междунар. участием, 18–22 сент. 2017 г., г. Екатеринбург (Екатеринбург: Институт геофизики УрО РАН, 2017), С. 187–191.
13. Короновский Н.В., Гогоненков Г.Н., Гончаров М.А., Тимурзиев А.И., Фролова Н.С. Роль сдвига вдоль горизонтальной плоскости при формировании структур “пропеллерного” типа // *Геотектоника*. 2009. № 5. С. 50–64.
14. Кузнецов О.Л., Чиркин И.А., Арутюнов С.И., Ризанов Е.Г., Дыбленко В.П., Дрягин В.В. Сейсмические исследования неравномерности открытой трещиноватости и неоднородности флюидонасыщения геологической среды для оптимального освоения месторождений нефти и газа // *Георесурсы*. 2018. Т. 20. № 3. Ч. 2. С. 206–215.
15. Лукьянов В.Ф. Радиально-концентрические структуры в восточной части Воронежского кристаллического массива (ВКМ) // *Вестн. ВГУ. Сер.: Геол.* 2000. Вып. 9. С. 31–37.
16. Муравьев В.В. Геодинамика и нефтегазонасыщенность систем концентрических дислокаций литосферы. – В кн.: *Условия образования и закономерности размещения залежей нефти и газа*. – Киев: Наукова Думка, 1983. С. 121–127.
17. Нестеренко М.Ю., Нестеренко Ю.М., Соколов А.Г. Геодинамические процессы в разрабатываемых месторождениях углеводородов (на примере Южного Предуралья). – Под ред. П.В. Панкратьева – Екатеринбург: УрО РАН, 2015. 186 с.
18. Ребецкий Ю.Л., Михайлова А.В., Сим Л.А. Структуры разрушения в глубине зон сдвига. Результаты тектонофизического моделирования. – В кн.: *Проблемы тектонофизики*. – М.: ИФЗ, 2008. С. 103–140.
19. Самарцев С.К., Данилова, Е.А., Драгунов А.А., Драгунов В.А. Геодинамически активные очаги генерации углеводородов как возможные источники восполнения залежей Оренбургского нефтегазо-

- конденсатного месторождения // Бурение и нефть. 2021. № 4. С. 10–13.
20. *Смирнова М.Н.* Нефтегазоносные кольцевые структуры и научно-методические аспекты их изучения // Геология нефти и газа. 1997. № 9. С. 1–6.
 21. *Тимурзиев А.И.* Развитие представлений о строении “цветковых моделей” Силвестра на основе новой кинематики модели сдвигов // Геофизика. 2010. № 2. С. 24–25.
 22. *Флоровская В.Н.* Углеродистые вещества в природных процессах. – Под ред. Ю.И. Пиковского – М: ГЕОС, 2003. 228 с.
 23. *Фролова Н.С.* Модели цветковых структур в зонах сдвига. – Мат-лы научной конф. “Ломоносовские чтения”, МГУ, апрель 2013 (М.: МАКС-Пресс, 2013. [Электронный ресурс] – Режим доступа: http://geo.web.ru/pubd/2013/09/18/0001187172/pdf/frolova_2013.pdf (дата обращения 24.02.2020).
 24. *Харченко В.М.* Природа структур центрального типа и закономерности распространения залежей углеводородов, локальных и региональных очагов землетрясений // Вестн. СКФУ. 2006. Т. 6. № 2. С. 48–53.
 25. *Хачай О.А., Дрягин В.В., Хачай А.Ю.* Исследования и моделирование нелинейных акустических процессов в слоистой среде с пористым флюидонасыщенным включением иерархического типа // Мониторинг. Наука и технологии. 2019. Т. 41. № 3. С. 77–83.
 26. *Чеботарева И.Я., Володин И.А., Дрягин В.В.* Акустические эффекты при деформировании структурно неоднородных сред // Акустический журнал. 2017. Т. 63. № 1. С. 84–93.
 27. *Якобсон К.Э., Казак А.П., Копылова Н.Н., Проскурнин В.Ф., Толмачева Е.В.* Атлас структур и текстур флюидно-эксплозивных пород. – Под ред. К.Э. Якобсона – СПб-6: Минерал, 2011. 79 с.
 28. *Bommer J.J., Oates S., Cepeda J.M., Lindholm C., Bird J.F., Torres R., Marroquín G., Rivas J.* Control of hazard due to seismicity induced by a hot fractured rock geothermal project // Engineer. Geol. 2006. Vol. 200683(4). P. 287–306.
 29. *Broccardo M., Mignan A., Wiemer S., Stojadinovic B., Giardini D.* Hierarchical Bayesian modeling of fluid-induced seismicity // Geophys. Res. Lett. 2017. Vol. 44. P. 11357–11367.
 30. *Buijze L., Van den Bogert P.A.J., Wassing B.B.T., Orlic B., TenVeen J.H.* Fault reactivation mechanisms and dynamic rupture modelling of depletion-induced seismic events in Rotliegend gas reservoir // Netherlands J. Geosci. 2017. Vol. 46. No. 5. P. 131–148.
 31. *Davison I., Barreto P.* Exhumed portuguese oil field suggests conjugate potential // GEOExPro. 2019. P. 38–40.
 32. *Dost B., Van Stiphout, A., Kühn D., Kortekaas M., Rui-grok E., Heimann S.* Probabilistic moment tensor inversion for hydrocarbon-induced seismicity in the groningen gas field, the Netherlands. Part 2: Application,” Seismol. Soc. Am. Bull. 2020. Vol. 110. No. 5. P. 2112–2123. <https://doi.org/10.1785/0120200076>
 33. *Grillot J.C.* Tectonics of Late and Post-Hercynian ages in the western of the Iberian Plate (Portugal) // Comptesrendus de l’Académie des Sciences. 1984. Vol. 299. P. 665–670
 34. *Hao H.J., Lin H.M., Yang M.X.* The Mesozoic in Chaoshan depression: A new domain of petroleum exploration // China Offshore Oil and Gas. 2001. Vol. 15. No. 3. P. 157–163. (in Chinese with English abstr.)
 35. *Laudon C., Qi J., Rondon A., Rouis L., Kabazi H.* An enhanced fault defection workflow combining machine learning and seismic attributes yields an improved fault model for Caspian Sea asset // First Break. 2021. Vol. 39. P. 53–60.
 36. *Mann P., Gahagan L., Gordon M.B.* Tectonic setting the world’s giant oil and gas fields. – In: *Giant oil and gas fields of the Decade 1990–1999*, Ed. by M.T. Halbouty, (Mem. AAPG. 2003. Vol. 78), P. 15–105.
 37. *McKiridy D.M.* Hydrocarbon generation and migration. – In: *The Petroleum Geology of South Australia.* – Vol. 2: *Eromanga Basin.* – Ed. by T.B. Cotton, M.F. Scardigno, J.E. Hibburt. – (Dprtm. Primary Industr. Res., Adelaide, South Australia, 2006. 2nd edn. Vol. 2. Ch. 10), P. 2–9.
 38. *Muntendam-Bos A.G., Hoedeman G., Polychronopoulou K., Draganov D., Weemstra C., van der Zee W., Bakker R.R., Roest H.* An overview of induced seismicity in the Netherlands // Netherlands J. Geosci. 2021. Vol. 101. P. 1–20.
 39. *Naumann S., Sakariassen R.* Diving deeper to reveal hydrocarbon potential in the Barents Sea // GEOExPro. 2019 (June). P. 20–24.
 40. *Naylor M.A., Mandl G., Sijpesteijn C.H.K.* Fault geometries in basement-induced wrench faulting under different initial stress states // J. Struct. Geol. 1986. Vol. 8. P. 737–752.
 41. *Saadallah A.* A proposed new tectonic model for the Northern Algerian Alpine Region based on studies of the Internal Zone rejects the previous model and suggests ideas for new hydrocarbon traps and prospects // GEOExPro. 2019 (June). P. 14–18.
 42. *Van den Bogert P.A.J.* Impact of various modelling options on the onset of fault slip and fault slip response using 2-dimensional Finite-Element Modelling // Shell Global Solutions Int. B.V. (Rijswijk). 2015. Available at <http://www.nam.nl/feiten-en-cijfers/onderzoeksrapporten>, (accessed August 7, 2020).
 43. *Van den Bogert P.A.J.* Depletion-induced fault slip and seismic rupture – 2D Geomechanical models for the Groningen field, The Netherlands // Shell Global Solutions Int. B.V. (Rijswijk). 2018. Available at <http://www.nam.nl/feiten-en-cijfers/onderzoeksrapporten>, (accessed August 7, 2020).
 44. *Zöller G., Holschneider M.* Themaximumpossible and themaximum expected earthquake magnitude for production-induced earthquakes at the gas field in Groningen Te Netherlands // Seismol. Soc. Am. Bull. 2016. Vol. 106. No. 6. P. 2917–2921.
 45. <http://yandex.ru/maps/geo/orenburg/53105182/?l=sat&ll=56.261353%2C51.629121&z=7> (Accessed March 30, 2022).

Orenburg Radial-Concentric Structure at Great Depth: Experimental Modeling under Fluid Dynamic Loads and Comparative Analysis of Sandstone Samples from Oil Fields in Western Siberia

E. A. Danilova*

*Bulashevich Institute of Geophysics, Ural Branch of the Russian Academy of Sciences,
st. Amundsena, bld. 100, 620016 Yekaterinburg, Russia*

**e-mail: yevgeniya.antoninovna@bk.ru*

The study of the deep structure of the Orenburg radial-concentric structure in the basement of the Russian Platform based on seismotectonic and geomorphological data has been carried out. Interpretation of temporal regional seismic profiles crossing the structure was performed, identifying the main deep faults and measuring their dip angles. It was revealed that the radial-concentric structure is a large flower structure. Its structure involves the main multidirectional deep faults dipping at angles of $\sim 60^\circ$ – 85° and limiting horst or reverse fault zones in the basement. The hierarchy of faults structure has been established. Oil and gas fields are confined to the main deep dislocations of the Orenburg structure and represent flower structures of minor sizes. An experimental modeling of the formation of “flower” structures was performed based on the analysis of the results of studies using data from the acoustic emission activity of rocks and under the action of fluid dynamic loads performed at the “UIK-AE” unit (Institute of Geophysics, Ural Branch of RAS, Russia) on sandstone core samples from reservoir rocks of oil fields in Western Siberia. The developed model showed that the formation of flower structures can occur without horizontal shear due to lateral compression and deep pressure. With the help of the seismo-acoustic emission method, characteristic noise was recorded during the formation of cracks in core samples, sound attenuation before splitting, and then its sharp explosive increase from a break in the continuity of the rock. Analysis of the core of wells drilled within the Orenburg radial-concentric structure revealed signs of hydrothermal fluid discharge in the sedimentary cover rocks, such as wavy (or flat) layering, bizarre textures and intervals of breccias, shell-shaped inclusions, stillotite seams, fluid textures. It is concluded that the genesis of the Orenburg radial-concentric structure is associated with the impact of deep heat flows, fluids, high pressure and has a commonality with the explosive ring structures of shields and platforms.

Keywords: Orenburg radial-concentric structure, time seismic sections, deep faults, flower structure, experimental modeling, explosive structures, oil and gas fields, hydrothermal fluid loads