



ANALYSIS OF THE FAULT-BLOCK STRUCTURE AND STRESS STATE OF THE SEDIMENTARY COVER IN GAS-CONDENSATE DEPOSITS: BASICS OF THE TECTONOPHYSICAL APPROACH

K.Zh. Seminsky ¹, Yu.P. Burzunova ¹✉, S.A. Bornyakov ¹, A.I. Miroshnichenko ¹, A.S. Cheremnykh ¹,
A.K. Seminsky ¹, I.V. Buddo ^{1,2}, A.S. Smirnov³, I.V. Gorlov³

¹ Institute of the Earth's Crust, Siberian Branch of the Russian Academy of Sciences, 128 Lermontov St, Irkutsk 664033, Russia

² Irkutsk National Research Technical University, 83 Lermontov St, Irkutsk 664074, Russia

³ Gazprom VNIIGAZ LLC, 19 Perekopskaya St, Tyumen 625003, Russia

ABSTRACT. Consideration is being given to the tectonophysical approach to the reconstruction of structure formation mechanisms and stress-strain state of rocks in hydrocarbon deposits localized in the platform cover, which has a complex structure in terms of rheological layering and disturbance by different-rank fractures. With the Kovykta gas condensate field, largest in Eastern Siberia, there were shown the main methods and ways of using modern achievements in tectonophysics for interpreting geological and geophysical information on the upper and lower parts of the sedimentary cover, unique in terms of volume and significance, that was obtained during geological exploration therein. Regularities of changes in the stress-strain state of rocks, found during the research, are combined into a tectonophysical model, which can be used as a base for other hydrocarbon deposits. The model is based on the concept of a zone-block structure of the platform cover, which is formed by a network of subvertical and subhorizontal fault zones that divide it into less faulted blocks. Disjunctive structures are highly fractured zones with concentration of relatively small low-amplitude faults, i.e. represent the early stages of faulting. The zone-block structure is formed mainly by tectonic or gravitational forces; in the first case, the stages and fracture characteristics are transformed onto the platform from the surrounding mobile belts, and in the second case they are determined by the presence of ductile rocks in the section capable of gravitational sliding. The graphic component of the tectonophysical model is 3D datasets that show the zone-block structure and stress state of rocks for the deposit with the degree of detail provided by key geophysical materials and, primarily, by seismic data. By modern GIS, this information can be quickly retrieved for any-size area of the studied rock mass and then used as a basis for solving production issues related to the development of deposits in fracture-pore reservoirs, or for analyzing general problems of their formation and dynamics.

KEYWORDS: tectonophysical approach; fault zone; stress field; zone-block structure; sedimentary cover; modeling; Kovykta gas condensate field

FUNDING: The generalization was performed on the materials as part of the 2021–2025 state assignment for the IEC SB RAS "Modern geodynamics, mechanism of lithosphere destruction and geologic hazards in the Central Asia" (scientific code FWEF-2021-0009). The work was conducted using equipment and infrastructure of the Centre for Geodynamics and Geochronology at the Institute of the IEC SB RAS (grant 075-15-2021-682).



RESEARCH ARTICLE

Correspondence: Yulia P. Burzunova, burzunova@crust.irk.ru

Received: May 25, 2022

Revised: August 10, 2022

Accepted: August 15, 2022

FOR CITATION: Seminsky K.Zh., Burzunova Yu.P., Bornyakov S.A., Miroshnichenko A.I., Cheremnykh A.S., Seminsky A.K., Buddo I.V., Smirnov A.S., Gorlov I.V., 2023. Analysis of the Fault-Block Structure and Stress State of the Sedimentary Cover in Gas-Condensate Deposits: Basics of the Tectonophysical Approach. *Geodynamics & Tectonophysics* 14 (2), 0689. doi:10.5800/GT-2023-14-2-0689

English version: see article page online

АНАЛИЗ РАЗЛОМНО-БЛОКОВОЙ СТРУКТУРЫ И НАПРЯЖЕННОГО СОСТОЯНИЯ ОСАДОЧНОГО ЧЕХЛА НА ГАЗОКОНДЕНСАТНЫХ МЕСТОРОЖДЕНИЯХ: ОСНОВЫ ТЕКТОНОФИЗИЧЕСКОГО ПОДХОДА

К.Ж. Семинский¹, Ю.П. Бурзунова¹, С.А. Борняков¹, А.И. Мирошниченко¹, А.С. Черемных¹,
А.К. Семинский¹, И.В. Буддо^{1,2}, А.С. Смирнов³, И.В. Горлов³

¹ Институт земной коры СО РАН, 664033, Иркутск, ул. Лермонтова, 128, Россия

² Иркутский национальный исследовательский технический университет, 664074, Иркутск, ул. Лермонтова, 83, Россия

³ ООО «Газпром ВНИИГАЗ», 625003, Тюмень ул. Перекопская, 19, Россия

АННОТАЦИЯ. Рассмотрено содержание тектонофизического подхода к реконструкции механизмов структурообразования и напряженно-деформированного состояния пород на месторождениях углеводородов, локализующихся в платформенном чехле, который отличается сложным строением в плане реологической расслоенности и нарушенности разноранговыми разрывами. На примере крупнейшего Ковыктинского газоконденсатного месторождения в Восточной Сибири показаны основные приемы и способы использования современных достижений тектонофизики для интерпретации уникальной по объему и значимости геолого-геофизической информации, полученной для верхней и нижней части осадочного чехла при проведении геологоразведочных работ. Закономерности напряженно-деформированного состояния пород, установленные в ходе исследований, объединены в тектонофизическую модель, которая может использоваться в качестве базовой для других месторождений углеводородного сырья. Основу модели составляют представления о зонно-блоковой структуре платформенного чехла, которую образует сеть субвертикальных и субгоризонтальных разломных зон, разделяющих его на менее нарушенные блоки. Дизъюнктивные структуры являются зонами повышенной трещиноватости и сгущения сравнительно мелких малоамплитудных разрывов, т.е. представляют ранние стадии разломообразования. Зонно-блоковая структура формируется главным образом под действием сил тектонической и гравитационной природы, причем в первом случае этапность и характер разрывообразования трансформируются на платформу со стороны окружающих подвижных поясов, а во втором – определяются наличием в разрезе пластичных пород, способных к гравитационному скольжению. Графической составляющей тектонофизической модели являются 3D объемы информации, отражающие зонно-блоковую структуру и напряженное состояние пород для месторождения с той степенью детальности, которую обеспечивают ключевые геофизические материалы, и прежде всего данные сейсморазведки. При помощи современных ГИС эта информация может оперативно извлекаться для любого по размеру участка изучаемого породного массива и затем использоваться в качестве основы для решения производственных вопросов, связанных с разработкой залежей в трещинно-поровых коллекторах, или для анализа общих проблем их образования и динамики.

КЛЮЧЕВЫЕ СЛОВА: тектонофизический подход; разломная зона; поле напряжений; зонно-блоковая структура; осадочный чехол; моделирование; Ковыктинское газоконденсатное месторождение

ФИНАНСИРОВАНИЕ: Обобщение материалов выполнено в рамках госзадания ИЗК СО РАН на 2021–2025 гг. «Современная геодинамика, механизмы деструкции литосферы и опасные геологические процессы в Центральной Азии» (шифр научной темы FWEF-2021-0009). В работе задействовались оборудование и инфраструктура ЦКП «Геодинамика и геохронология» ИЗК СО РАН в рамках гранта № 075-15-2021-682.

1. ВВЕДЕНИЕ

Знание закономерностей строения и напряженно-деформированного состояния осадочного чехла имеет определяющее значение для эффективного поиска и разведки продуктивных залежей на месторождениях углеводородного сырья со сложной структурой. Разработка подобных трудноизвлекаемых запасов в настоящее время становится одним из главных приоритетов освоения нефтегазового комплекса России [Kontorovich, Eder, 2015]. При этом ключевой проблемой является выбор мест безаварийного бурения разведочных и эксплуатационных скважин в породном массиве, который характеризуется неоднородным напряженно-деформированным

состоянием вследствие наличия зон повышенной нарушенности субстрата и участков аномального пластового давления. Задача их достоверного картирования приобретает все большую актуальность по мере исчерпания запасов на месторождениях мира с относительно простым строением коллекторов. В этих условиях особое значение имеют методы тектонофизики, которые позволяют на основе анализа уникальных по детальности геофизических данных (прежде всего 3D сейсморазведки) выделять разломные зоны, реконструировать напряженное состояние породного массива и определять механизмы его деструкции под действием сил тектонической и гравитационной природы.

По отношению к данной статье, где основным объектом для анализа являются зоны разрывов, следует отметить, что существенным толчком к развитию научного направления, которое сегодня можно назвать «Тектонофизика разломов», явились исследования 70-х годов XX века, результаты которых опубликованы в журнале «American Association of Petroleum Geologists Bulletin» [Wilcox et al., 1973; Harding, 1974; Harding, Lowel, 1979]. Изучение структурного контроля месторождений углеводородов разломными зонами послужило причиной углубленного изучения их внутреннего строения посредством анализа механизмов формирования, в том числе и методами физического моделирования. Были созданы основы тектоники сдвиговых зон [Sylvester, 1984], а именно установлена стадийность их формирования, неравномерность внутреннего строения и парагенезис разрывов 2-го порядка, который затем был применен для выделения типовых совокупностей вторичных нарушений, имеющих место вблизи сбросов, взбросов и надвигов [Sherman et al., 1983; Seminsky, 1990, 2003]. Закономерности разломообразования, полученные в результате работ специалистов иркутской тектонофизической школы [Sherman, 1977; Sherman et al., 1983, 1991, 1992, 1994; Seminsky, 1990], впоследствии были положены в основу изучения месторождений углеводородов (УВ) Западной Сибири: картирования разломных зон по данным сейсморазведки, их классифицирования по степени активизации и стадиям развития внутренней структуры [Glukhmanchuk, Vasilevskiy, 1998, 2013]. В последние годы методы тектонофизики активно используются для выявления механизмов разрывообразования в осадочном чехле, строение которого на нефтегазоносных территориях детально изучено по материалам 3D сейсморазведки [Koronovsky et al., 2009; Gogonenkov, Timurziev, 2012].

Таким образом, в настоящее время на новом уровне сформировались предпосылки для исследования структуры месторождений УВ с применением тектонофизического подхода. С одной стороны, это связано с повышением детальности исследования недр за счет интенсивного развития технологии съемок и создания банка кондиционных геофизических данных по многим лицензионным площадям. С другой стороны, тектонофизика в рамках своих главных составляющих достигла уровня, на котором полученные закономерности и технологии могут быть эффективно применены в практике поисков, разведки и эксплуатации месторождений УВ со сложной структурой.

Цель данной статьи – представить основные принципы и этапы комплексного тектонофизического подхода к выявлению разломно-блоковой структуры и реконструкции напряженного состояния осадочного чехла, характер дислоцированности которого необходимо учитывать при разведке и эксплуатации залежей УВ.

Полноценное исследование в области тектонофизики – науки о механизмах формирования деформационных структур земной коры [Gzovsky, 1975] – включает

четыре основных этапа. Во-первых, это выявление (картирование) в породном массиве системы структурных элементов (разломов, складок и др.), во-вторых, реконструкция на основе анализа их характеристик поля (или полей) напряжений, в-третьих, воспроизведение в аналоговом или численном эксперименте механизма формирования изучаемой структуры и, в-четвертых, создание тектонофизической модели объекта, которая может быть использована для теоретических обобщений или решения связанных с ним проблем прикладного характера.

Как следствие, задачами проведенной работы было краткое рассмотрение тектонофизических исследований современного уровня в рамках каждого из перечисленных этапов (видов) работ на примере месторождения УВ, характеризующегося сложным строением.

2. ОБЪЕКТ ИССЛЕДОВАНИЙ

В качестве объекта исследований было выбрано гигантское Ковыктинское газоконденсатное месторождение (ГКМ), располагающееся в Восточной Сибири (рис. 1, а). Сложность его изучения заключается в дислоцированности пород под действием сил тектонической и гравитационной природы. В тектоническом плане район исследований относится к платформенной периферии складчато-надвигового пояса, наиболее дислоцированная часть которого располагается юго-восточнее изучаемой территории. Однако относительно слабое проявление разрывных структур тектонического генезиса осложнено в пределах ГКМ деформациями гравитационного происхождения, приуроченными к пластичным соленосным слоям.

Это позволяет отнести Ковыктинское ГКМ к объектам со сложной структурой, которым свойственно неравномерное распределение продуктивных залежей, проявление в природных трещинных резервуарах аномально низких и аномально высоких давлений флюидных систем, выходы рапы или поглощения бурового раствора в процессе проходки скважин. Перечисленные осложнения в полной мере характерны для Ковыктинского лицензионного участка (ЛУ) [Vakhromeev et al., 2016; Gorlov et al., 2016; Ilyin et al., 2016; Smirnov et al., 2016; Buddo et al., 2016], на примере которого в данной статье иллюстрируются основные этапы тектонофизического подхода к выявлению структуры и напряженного состояния осадочного чехла (рис. 1, а). Предварительные результаты применения данного подхода были представлены ранее главным образом для северо-востока ЛУ [Seminsky et al., 2018], что позволяет не описывать их здесь детально.

Ковыктинский ЛУ располагается в центральной части месторождения, находящегося на востоке Ангаро-Ленской тектонической ступени (юг Сибирской платформы). В неотектоническом плане месторождение принадлежит к Ангаро-Ленскому поднятию [Sankov et al., 2017], которое по мере продвижения на юго-восток сменяется кайнозойским Предбайкальским прогибом и затем структурами Байкальской рифтовой зоны (БРЗ).

Участок исследований в первом приближении ограничен на востоке Хандинским, а на юг-юго-востоке – Жигаловским разломом (рис. 1, а). Особенности проявления этих и более мелких разрывных структур на юге Сибирской платформы, а также складчатых деформаций осадочного чехла описаны многими предшественниками [Zolotarev, 1967; Ryazanov, 1973; Zamaraev et al., 1976; Dubrovin, 1979; Zolotarev, Khrenov, 1981; Logachev, 1984; Malykh, 1985; Sizykh, 2001; Ufimtsev et al., 2005; Sankov et al., 2017]. Анализ этих работ в совокупности с данными недавних целенаправленных исследований [Seminsky et al., 2018] позволил сделать вывод о существенной роли дислокаций осадочного чехла в миграции и локализации углеводородов и, как

следствие, о необходимости корректировки базовых представлений о строении газоконденсатного месторождения.

Мощность земной коры в районе Ковыктинского ГКМ составляет ≈ 40 км [Mats et al., 2001]. Кристаллический фундамент в пределах ЛУ залегает на уровне примерно -2500 м. По структурно-литологическим особенностям в строении осадочного разреза выделяются три главных формационных комплекса: подсолевой, соленосный и надсолевой. Подсолевой комплекс сложен терригенными породами венда и карбонатами нижнего кембрия. Он является основной газосодержащей толщей региона: в составе чорской свиты венда выделяется парфеновский горизонт, с которым связаны основные запасы

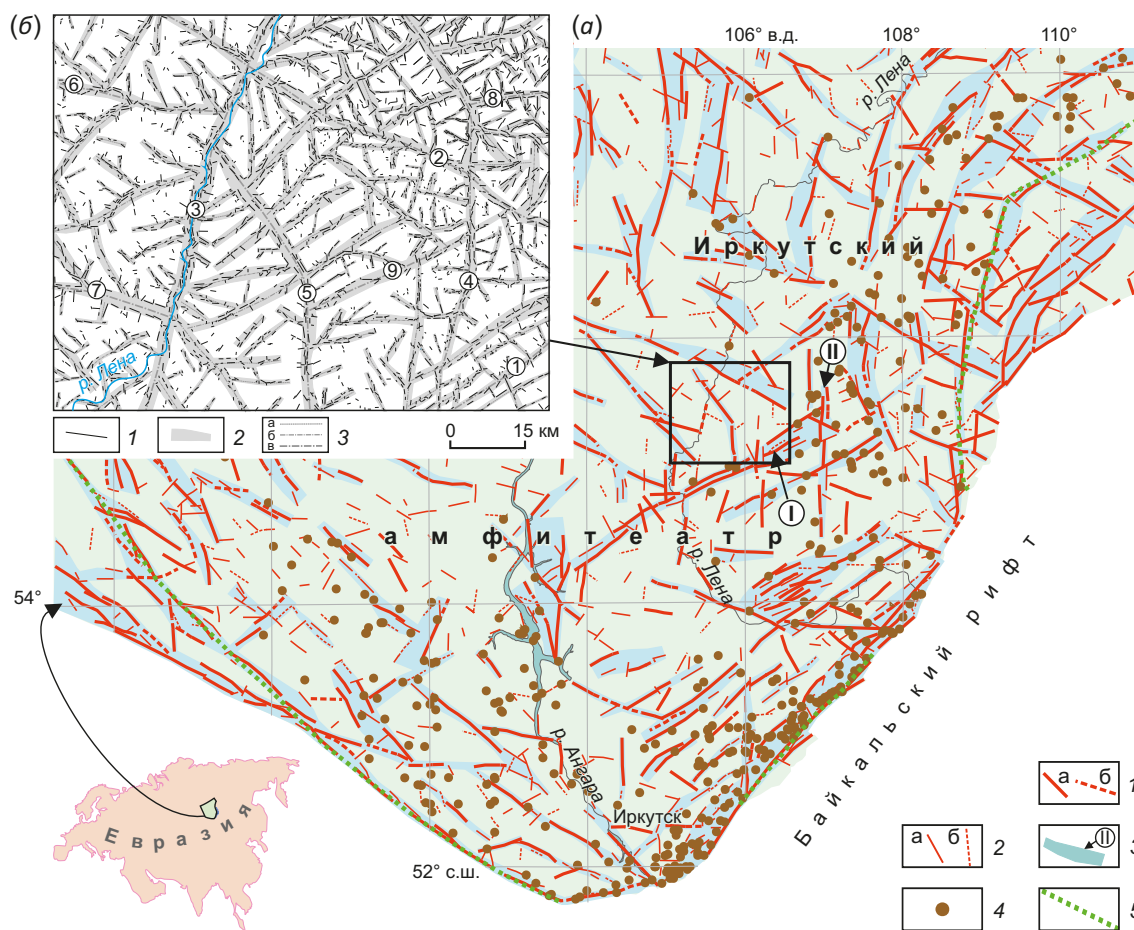


Рис. 1. Разноранговые разломные зоны Иркутского амфитеатра, выделенные на основе линейментного анализа рельефа. (а) – схема разломных зон юга Иркутского амфитеатра: 1–2 – крупные (1) и мелкие (2) разрывы, отчетливо (а) и менее отчетливо (б) выраженные в рельефе; 3 – разломные зоны, в том числе Жигаловская (I) и Хандинская (II); 4 – эпицентры землетрясений согласно каталогу Байкальского филиала ФИЦ ЕГС РАН; 5 – краевой шов платформы. (б) – схема разломных зон Ковыктинского лицензионного участка: 1 – линейменты рельефа; 2 – разломные зоны, находящиеся на ранней стадии развития внутренней структуры; 3 – оси зон 3-го (а), 2-го (б) или 1-го (в) масштабного ранга. Цифры в кружках – номера зон 1-го порядка.

Fig. 1. Different-rank fault zones of the Irkutsk amphitheater identified on the basis of relief lineament analysis. (а) – scheme of fault zones in the south of the Irkutsk amphitheater: 1–2 – large (1) and small (2) fractures, clearly (а) and less clearly (б) defined; 3 – fault zones, incl. Zhigalovskaya (I) and Khandinskaya (II); 4 – earthquake epicenters according to the catalog published by the Baikal Branch of the RAS Geophysical Survey; 5 – marginal suture of the platform. (б) – scheme of fault zones of the Kovyktinskaya license area: 1 – relief lineaments; 2 – fault zones at an early stage of development of the internal structure; 3 – axes of zones of the 3rd (а), 2nd (б) or 1st (в) scale ranks. The numbers in circles are the numbers of zones of the 1st order.

газа. Коллектор сложен песчаниками и считается поровым, что в целом согласуется с моноклинальным залеганием пород, погружающихся под небольшими углами в северо-западном и северном направлении [Seminsky et al., 2018]. Породы соленосного, или солевого, комплекса представлены переслаиванием каменной соли с доломитами, известняками и ангидритами. По структурно-литологическим признакам верхняя часть комплекса (ангарская и литвинцевская свиты кембрия) отличается от нижней: она характеризуется существенно большей дислоцированностью пород, среди которых нередки прослои мергелей, песчаников и доломитов. Надсолевой комплекс сложен терригенно-карбонатными породами среднего и верхнего кембрия, а также терригенными породами ордовика.

Разное положение в разрезе и отличия в строении подсолевого, нижнего солевого, верхнего солевого и надсолевого комплексов Ковыктинского ГКМ предопределили особенности методических подходов, использованных для изучения их структуры. Как следствие, при описании ряда полученных результатов они рассматриваются отдельно.

3. ЗОННО-БЛОКОВАЯ СТРУКТУРА ОСАДОЧНОГО ЧЕХЛА

3.1. Тектонофизические предпосылки исследований

В соответствии с современными представлениями о тектонической делимости литосферы в целом и земной коры в частности их главными структурными элементами являются подвижные зоны и вычленяемые ими сравнительно стабильные блоки [Sadovsky et al., 1987; Seminsky, 2008]. Такая зонно-блоковая структура (ЗБС) имеет место на разных иерархических уровнях организации вещества, причем для масштабов земной коры роль межблоковых зон выполняют разломы в их широкой тектонофизической трактовке. Согласно работам [Sherman et al., 1983; Seminsky, 2003], в объем данного понятия входит не только узкая полоса тектонитов магистрального сместителя (разрыв 1-го порядка), но и существенно более широкая зона распространения структур 2-го порядка, образовавшихся на трех главных стадиях разломообразования (рис. 2, а).

На ранней дизъюнктивной стадии (рис. 2, а, I) имеет место широкая зона сравнительно мелких опережающих разрывов, которую в геологической практике часто называют зоной повышенной трещиноватости, зоной скрытого разлома фундамента и пр. На поздней дизъюнктивной стадии (рис. 2, а, II) разлом выражен зоной распространения опережающих разрывов, представленных небольшими сегментами магистрального сместителя, между которыми располагаются интенсивно нарушенные области их сочленения друг с другом. Разлом на дизъюнктивной стадии полного разрушения (рис. 2, а, III) представлен единым магистральным сместителем и разрывами оперения.

Разлом, прошедший все три стадии формирования внутренней структуры, характеризуется трехчленной

поперечной зональностью (рис. 2, в). В его крыльях последовательно сменяют друг друга следующие подзоны: периферийная подзона парагенетически связанной трещиноватости, сформировавшаяся на стадии I; подзона разрывов 2-го порядка и повышенной трещиноватости, образовавшаяся на стадии II; подзона магистрального сместителя, сформировавшаяся на стадии III. Если процесс разломообразования не завершен, то зона может быть представлена только двумя (I и II) или одной (I) подзоной. Последняя ситуация типична для осадочного чехла платформ, где интенсивность тектонического воздействия обычно недостаточна для формирования магистрального сместителя, который имеет место в фундаменте. Таким образом, зонно-блоковая структура платформенного чехла, вмещающего месторождения углеводородов, должна быть представлена главным образом слабонарушенными блоками, границами которых являются зоны разломов ранних стадий развития. Их структуру образуют сравнительно мелкие разрывы и трещины, а также складки, поскольку пластическая компонента представляет существенную часть общей деформации скальвания [Seminsky, 2003].

3.2. Верхняя часть разреза осадочной толщи

В этих условиях картирование ЗБС на месторождениях углеводородного сырья становится нетривиальной задачей, решение которой осложняется слабой обнаженностью пород на поверхности. Как следствие, выявление разломных зон в верхней части разреза обычно базируется на **линеаментном анализе рельефа**, так как происхождение его спрямленных элементов (прямолинейных или слабоизогнутых уступов, отрезков речных долин и пр.) во многом обусловлено наличием тектонических нарушений. Известный субъективизм в выделении линеаментов нивелируется использованием серии карт и схем рельефа изучаемой территории. Их основой являются, с одной стороны, цифровые модели, построенные с применением космоснимков высокого разрешения (например, SRTM и ASTER GDEM2), а с другой – карты и ортопланы детальных участков, полученные с использованием беспилотных летательных аппаратов.

Результатом линеаментного анализа рельефа Иркутского амфитеатра стала схема разломных зон (см. рис. 1, а), построенная по цифровой модели рельефа на базе космоснимков SRTM. Большинство выделенных структур представляют в платформенном чехле раннюю или позднюю дизъюнктивную стадию развития разломов, за исключением Жигаловского и некоторых других крупных нарушений вблизи краевого платформенного шва. Кроме выделения разломных зон, космоснимки SRTM применялись при построении карты рельефа вершинной поверхности и оконтуривания локальных поднятий [Logachev, 1984]. Одно из них выделено и описано В.А. Саньковым у восточной границы Ковыктинского ЛУ [Seminsky et al., 2018], что имеет существенное значение для определения генезиса

разрывных и складчатых структур, поскольку подобные поднятия могут быть причиной гравитационного скольжения пластичных пород в сторону понижения рельефа.

Схема линеаментов Ковыктинского участка (см. рис. 1, б) была построена на основе анализа рельефа с использованием цифровой модели Aster GDEM2, обладающей площадным разрешением ≈ 15 м. Даже если не отождествлять все выделенные линеаменты с тектоническими разрывами, зоны их повышенной плотности

с большой долей уверенности следует относить к разломным. Многие из них совпадают с долинами рек, которые подчеркивают ослабленные участки земной коры. Составленная схема дает отчетливое представление о зонно-блоковом строении верхней части осадочного чехла, причем разломные зоны, находящиеся на ранних стадиях развития, образуют практически замкнутую сеть и характеризуются иерархической соподчиненностью. Наиболее широкие и протяженные зоны 1-го ранга соответствуют структурам, которые выделяются для

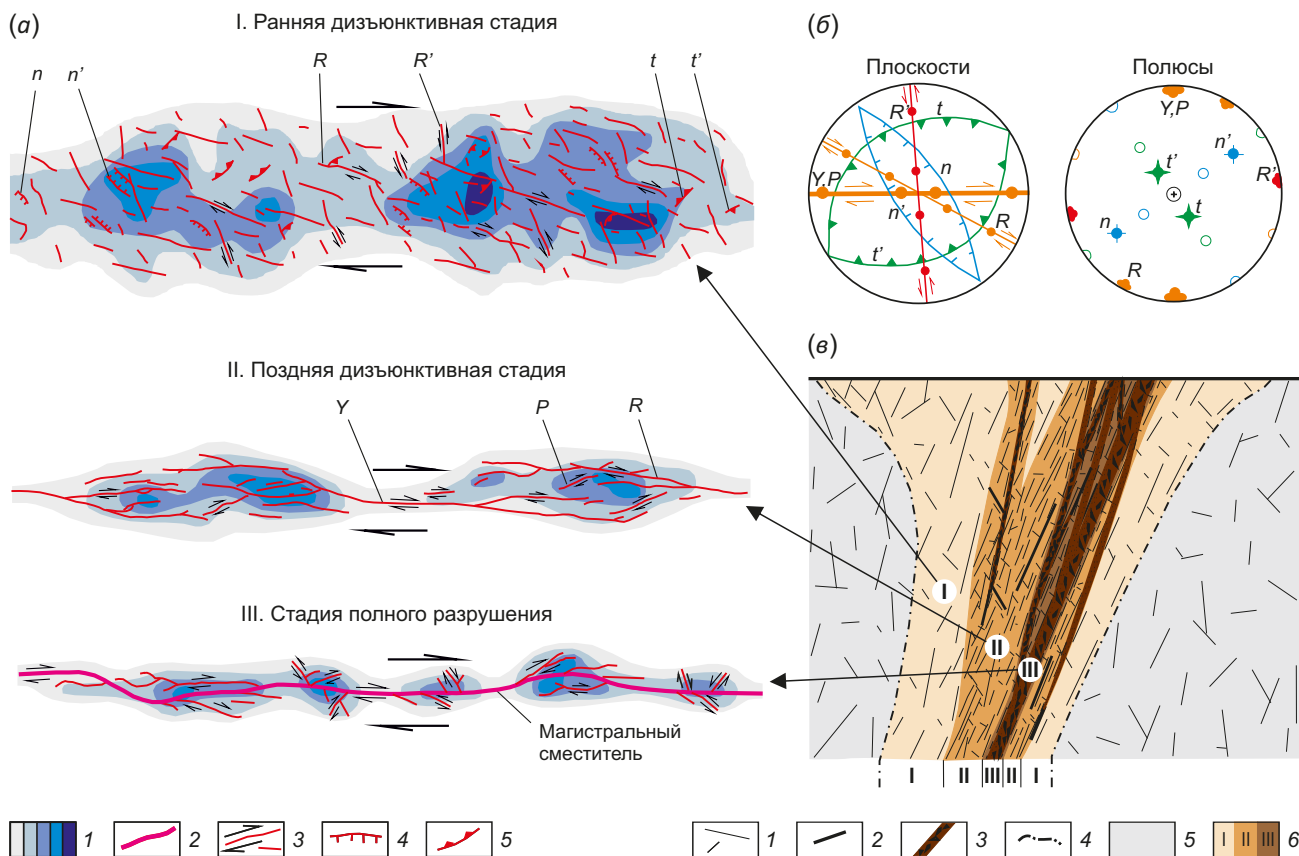


Рис. 2. Структура разломной зоны (на примере правого сдвига). (а) – строение разломной зоны на трех главных стадиях развития: 1 – участки с различным количеством разрывов в единице площади; 2 – магистральный сместитель (разрыв 1-го порядка); 3–5 – сдвиги (3), сбросы (4) и надвиги (5) 2-го порядка. Латинские буквы – разнотипные разрывы 2-го порядка (n' , n , R' , R , t' , t , P) и магистральный сместитель 1-го порядка (Y). (б) – эталонные парагенезисы (графареты) разрывов 2-го порядка для сдвиговой зоны, представленные на круговых диаграммах в плоскостях и полюсах. Цветом показаны: оранжевым – правые сдвиги, красным – левые сдвиги, синим – сбросы, зеленым – надвиги. Незалитые кружки – полюсы сопряженных систем трещин. (в) – модель 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.

Fig. 2. The structure of the fault zone (by the example of the right-lateral strike-slip fault). (a) – structure of the fault zone at three main stages of development: 1 – areas with a different number of fractures per square unit; 2 – main fault plane (fracture of the 1st order); 3–5 – strike-slip faults (3), normal faults (4) and thrusts (5) of the 2nd order. Latin letters are different-type fractures of the 2nd order (n' , n , R' , R , t' , t , P) and the main fault plane of the 1st order (Y). (b) – standard parageneses (patterns) of 2nd order fractures for the strike-slip zone, presented on circular diagrams by planes and poles. Orange indicates right-lateral strike-slip faults, red – left-lateral strike-slip faults, blue – normal faults, and green stands for thrusts. Unfilled circles are poles of conjugated fracture systems. (c) – transverse fault zonation model (with the fault undergone all three stages of fracturing): 1 – jointing; 2 – large joint; 3 – fault plane filled with tectonites; 4 – outer boundary of the fault zone; 5 – slightly disturbed rock mass; 6 – main elements of the internal structure of the fault zone, formed at different stages of fracturing.

Иркутского амфитеатра в целом [Zolotarev, 1967; Zama-raev et al., 1976; Logachev, 1983, 1984; Zolotarev, Khrenov, 1981; Khrenov, 1982; Malykh et al., 1987; Migursky, Starosel'tsev, 1989; Sankov et al., 2017] (см. рис. 1). Ширина и протяженность более мелких разломных зон позволяют разделить их на два масштабных ранга, причем по ориентации они в целом тяготеют к тем же четырем системам, что и крупные зоны, т.е. северо-восточной, северо-западной, субмеридиональной и субширотной.

Кроме линеamentного анализа, для картирования разломных зон в верхней части чехла на месторождениях углеводородов могут применяться **методы сейсмо- и электроразведки в их малоглубинных модификациях, а также способы выделения проницаемых участков на основе газовой съемки разного типа**. Однако интерпретация их результатов осложняется влиянием многочисленных факторов нетектонической природы, главные из которых являются следствием воздействия подземных вод, разнотипных экзогенных процессов, а также влиянием атмосферной нагрузки. В плане выделения дизъюнктивной структуры эффективность съемок повышается, если в основу интерпретации результатов положены тектонофизические закономерности строения разломных зон (рис. 2, в).

Так, трехчленная зональность разломов зон предполагает различную степень нарушенности субстрата в пределах отдельных подзон и, как следствие, разную проницаемость в отношении флюидов и газов, что отражается в поле удельного электрического сопротивления и интенсивности выделения газов из породного массива. К настоящему времени наиболее формализованной представляется методика тектонофизической интерпретации данных электроразведки, разработанная на примере малоглубинной томографии [Seminsky, Bobrov, 2009, 2018; Seminsky et al., 2016] и съемки методом зондирования становлением поля в ближней зоне (ЗСБ) [Seminsky et al., 2019]. В цитированных публикациях показано, что применение тектонофизического подхода позволяет оконтуривать разломные зоны, а также устанавливать особенности их внутреннего строения.

Особое значение для месторождений углеводородов имеет применение подобного подхода к интерпретации материалов газовой съемки, и прежде всего радона. Этот радиоактивный газ в силу инертности удобен для проведения измерений, является маркером для разрывных нарушений [Schery et al., 1982; King et al., 1996; Ioannides et al., 2003; Utkin et al., 2006; Seminsky, Bobrov, 2009; Lombardi, Voltattorni, 2010; Seminsky, Demberel, 2013] и, кроме этого, примыкает к колонне таких мигрирующих из глубин газов, как водород, метан, азот, углекислый газ [Etioppe, Martinelli, 2002; Shuleikin, 2018]. Методика выделения трехчленной зональности дизъюнктивов по данным газовых съемок еще не формализована, однако само ее существование было зафиксировано в ходе площадного бурения на месторождениях нефти в Западной Сибири [Volpin et al., 2018]. Это явилось основанием для изменения схемы разработки месторождений – от обычно используемой равномерной (в плане заложения

нагнетательных и добывающих скважин) до той, которая учитывает внутреннее строение разломных зон. Так, эффективной для извлечения запасов стала схема с расположением нагнетательных скважин в слабонарушенных блоках, а добывающих – в подзоне II (рис. 2, в), как наиболее проницаемой для флюидов и газов.

На Ковыктинском ГКМ представленный подход применялся для заверки положения разломных зон, выделенных при помощи линеamentного анализа рельефа. На примере северо-восточной части лицензионной площади, где были реализованы электроразведочная и газовая съемки, было показано [Seminsky et al., 2019], что рис. 1, б, в главных чертах отражает зонно-блоковую структуру верхней части осадочного чехла.

Полевые геолого-структурные и морфотектонические методы в связи со слабой обнаженностью пород платформенного чехла и неконтрастным рельефом многих платформенных регионов являются второстепенными при картировании разломных зон. Наблюдения носят фрагментарный характер, но имеют важное значение для определения таких параметров зон, как элементы залегания, степень активности в неоген-четвертичное время и др. При наличии схемы зонно-блоковой структуры, составленной по данным линеamentного анализа (см. рис. 1, б), эти характеристики, полученные для одного коренного выхода, могут быть перенесены на всю пространственно связанную с ним зону. С каждым подобным наблюдением информативность схемы ЗБС возрастает.

3.3. Нижняя часть разреза осадочной толщи

Основными методами картирования зонно-блоковой структуры в глубоких частях осадочных комплексов являются 3D электро- и сейсморазведочные съемки, реализующиеся в больших объемах на месторождениях УВ [Rybalchenko et al., 2020; Buddo et al., 2021]. Границы блоков, представленные магистральными сместителями, отчетливо выделяются на геоэлектрических или сейсмических разрезах смещением маркирующих горизонтов, осей синфазности и пр. [Mushin et al., 2001; Baudon, Cartwright, 2008; Bull et al., 2009; Jackson, Rotevatn, 2013; Rønning et al., 2014; Reeve et al., 2015; Iacopini et al., 2016; Hu et al., 2021; и мн. др.]. Однако у доминирующих в чехле разломов ранних стадий развития общая амплитуда распределяется по широкой зоне распространения мелких разрывов, что практически не позволяет фиксировать на разрезах смещения маркирующих слоев.

Для электроразведочных данных выход из подобной ситуации возможен в тех случаях, когда такие разломные зоны являются проводниками флюидов. В поле УЭС они выделяются низкоомными областями, что и было установлено для глубоких частей осадочного разреза на Ковыктинской площади [Seminsky et al., 2018]. Так, на картах электропроводности отдельных горизонтов солевого и подсолевого комплексов имеют место участки повышенной электропроводности, характеризующиеся линейно вытянутой формой

и системным расположением в плане. Наиболее крупные из них трассируются через несколько или через все изученные горизонты, образуя практически замкнутую сеть. Это позволяет обоснованно предположить, что рассматриваемые зоны имеют разломное происхождение и, таким образом, представляют главный составляющий элемент зонно-блоковой структуры нижней части платформенного чехла.

Для сейсморазведочных данных в качестве основного способа выделения зон сгущения безамплитудных разрывов применяется атрибутный анализ куба сейсмической информации [Interpreter’s Guide..., 2007]. Основными операциями, рекомендуемыми для обнаружения разрывов и других линейных аномалий волновой картины, являются «Ант-трекинг» и «Дисперсия» [Pedersen et al., 2002; Silva et al., 2005; Aarre et al., 2012; Basir et al., 2013; Khair et al., 2012]. Их совместное использование для Ковыктинского участка позволило

получить куб совокупности плоскостей, которые представляют разрывные структуры. На рис. 3 и 4, а, представлены сети разрывов, выделенных из сейсмокуба для подсолевого комплекса, вмещающего на Ковыктинском ГКМ основную часть продуктивных залежей. Отчетливо проявлены линейно вытянутые участки сгущения субпараллельных и кулисных разрывов, представляющих разломные зоны. Лишь в единичных зонах имеют место протяженные разрывы, свидетельствующие о поздних стадиях разломообразования, тогда как в подавляющем большинстве они характеризуются ранней стадией развития внутренней структуры. Наиболее крупные из зартированных зон (1, 3, 6 и др.) полностью или фрагментарно проявлены на схеме разломных структур Ковыктинского участка, составленной для верхней части разреза на основе линейментного анализа (см. рис. 1, б). Пространства, окруженные разломными зонами, – блоки – характеризуются

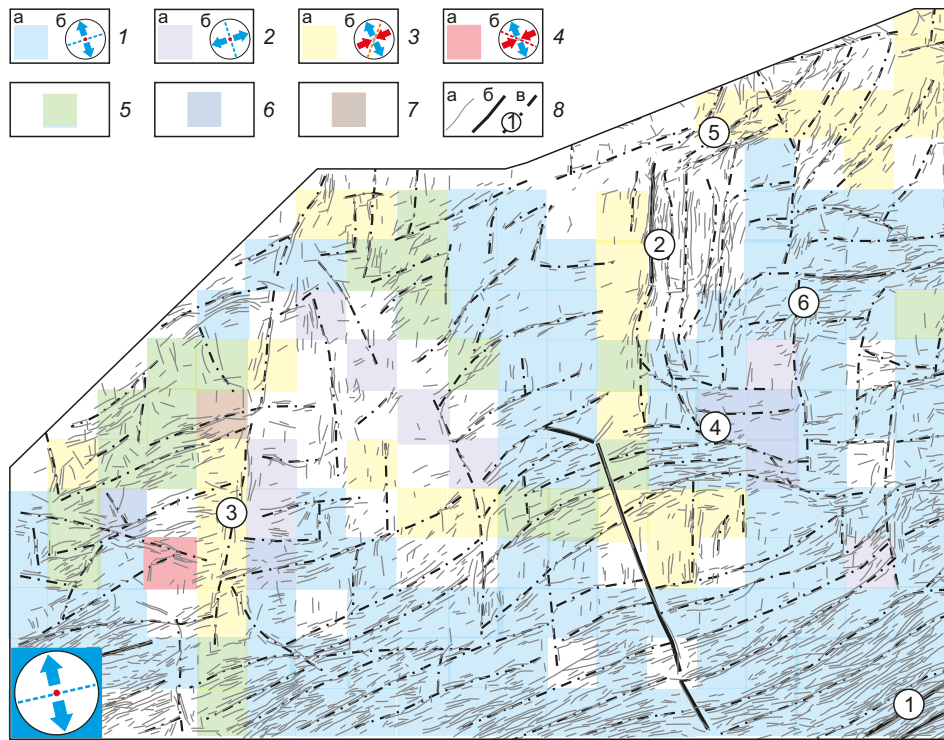


Рис. 3. Напряженно-деформированное состояние пород подсолевого комплекса для этапа растяжения осадочного чехла Ковыктинского участка в направлении СЗ–ЮВ (см. стресс-тензор внизу слева).

1–7 – разнотипные динамические обстановки локального ранга: растяжения в направлении СЗ–ЮВ (1), растяжения в направлении СВ–ЮЗ (2), правого сдвига (3), левого сдвига (4), наложения растяжения в направлении СЗ–ЮВ и правого сдвига (5), наложения растяжения в направлении СЗ–ЮВ и растяжения в направлении СВ–ЮЗ (6), наложения растяжения в направлении СЗ–ЮВ, левого и правого сдвигов (7): а – области проявления данной обстановки в пределах участка, б – соответствующий ей тензор напряжений; 8 – разрывные структуры: а – разрывы, выделенные из куба сейсмической информации, б – разломы магистрального типа, в – оси зон сгущения разрывов (разломные зоны ранних стадий развития), наиболее крупные из которых отмечены номерами.

Fig. 3. Stress-strain state of rocks of the subsalt complex for the stage of NW–SE extension of the sedimentary cover of the Kovykta area (see stress tensor at the bottom left).

1–7 – different types of local-rank dynamic settings: NW–SE extension (1), NE–SW extension (2), right-lateral shear (3), left-lateral shear (4), superposition of NW–SE extension and right-lateral shear (5), superposition of NW–SE extension and NE–SW extension (6), superposition of NW–SE extension and right-lateral and left-lateral shears (7): а – areas of occurrence of this setting within the site, б – its corresponding stress tensor; 8 – faulting structures: а – fractures identified from a 3D seismic dataset, б – major faults, в – axes of fault concentration zones (early-stage fault zones), with the largest of which numbered.

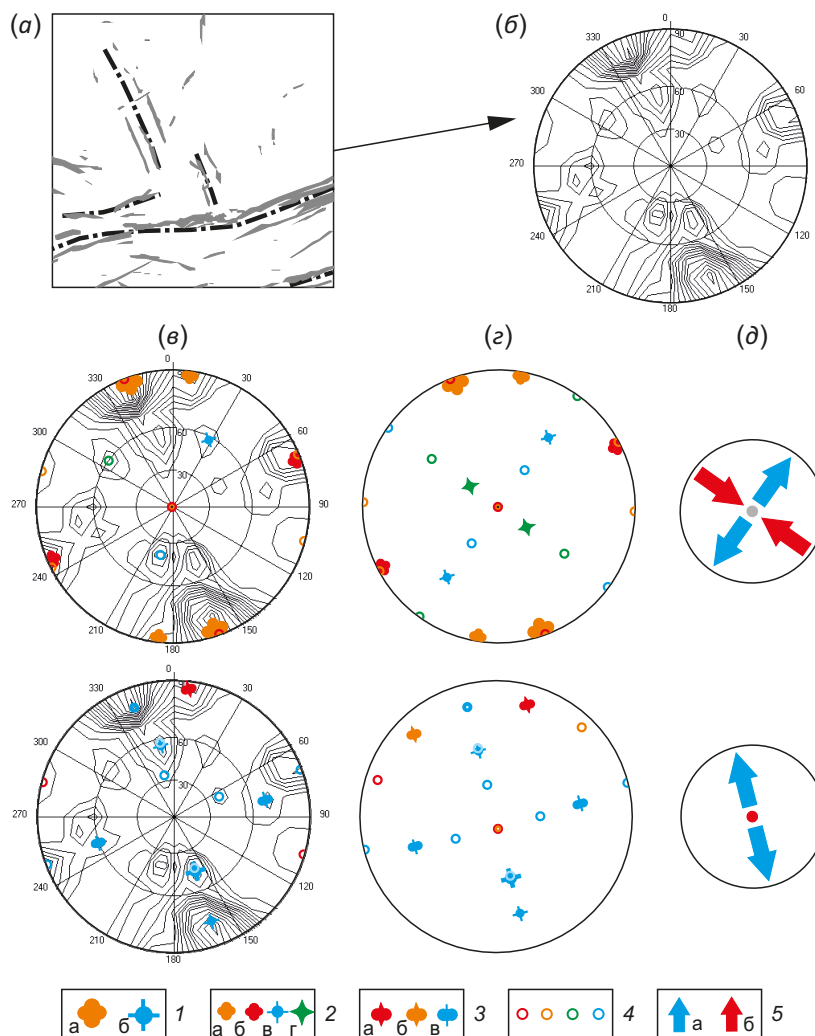


Рис. 4. Пример парагенетического анализа разрывов, выделенных из куба сейсмической информации в пределах одной ячейки.

(а) – положение разрывов (серый цвет) и осей их сгущения (черный штрихпунктир) при виде сверху. (б) – круговая диаграмма разрывов (94 шт.). (в) – результат сравнения диаграммы с эталонными парагенезисами (г) в виде двух решений: для правосторонней разломной зоны (вверху) и сбросовой зоны (внизу), а также соответствующие им стресс-тензоры сдвига и растяжения (д). 1 – полюсы плоскостей правостороннего (а) и сбросового (б) сместителя 1-го порядка; 2 – полюсы плоскостей правостороннего (а), левостороннего (б), сбросового (в) и взбросового (г) разлома 2-го порядка; 3 – полюсы взбрососдвиговых (а, б) и сдвигосбросовых (в) разломов 2-го порядка; 4 – полюсы второстепенной или дополнительной системы мелких разрывов 3-го порядка; 5 – положение субгоризонтальных осей главных нормальных напряжений растяжения (а) и сжатия (б).

Fig. 4. An example of a paragenetic analysis of fractures extracted from a 3D seismic dataset within one cell.

(а) – position of fractures (gray color) and their concentration axes (black dash-dotted line) as seen from above. (б) – circular diagram of fractures (94 pcs.). (в) – result of comparing the diagram with the standard parageneses (г) in the form of two solutions: for the right-lateral strike-slip fault zone (top) and for the normal fault zone (bottom), and their corresponding strike-slip and extension stress tensors (д). 1 – poles of the planes of right-lateral strike-slip (а) and normal (б) 1st-order faults; 2 – poles of the planes of right-lateral strike-slip (а), left-lateral strike-slip (б), normal (в), and reverse (г) faults of the 2nd order; 3 – poles of reverse-strike-slip (а, б) and strike-slip normal faults (в) 2nd-order faults; 4 – poles of a secondary or additional system of small 3rd-order fractures; 5 – position of subhorizontal axes of principal normal extension (а) and compression (б) stresses.

более редкой сетью разрывов, которые, как правило, не образуют отчетливо выраженных систем.

3.4. Выводы

Применение тектонофизического подхода к интерпретации разнотипных геолого-геофизических данных свидетельствует о зонно-блоковой делимости осадочного

чехла на Ковыктинском ГКМ: относительно слабонарушенные блоки контактируют по широким зонам повышенной плотности разрывов, не являющимся в большинстве случаев магистральными. Крупные зоны нарушают весь чехол, но проявляются на разных уровнях с разной степенью выраженности, что свидетельствует о специфике деформаций отдельных комплексов.

4. НАПРЯЖЕННОЕ СОСТОЯНИЕ ОСАДОЧНОГО ЧЕХЛА

4.1. Тектонофизические предпосылки исследований

В тектонофизике методы реконструкции стресс-тензоров делятся на парагенетические (основывающиеся на пространственных соотношениях разрывов) и кинематические (базирующиеся на ориентации разрыва и направлении скольжения по нему) [Sim, 2013]. В нефтегазовой геологии могут использоваться обе группы методов, но первая более востребованна, поскольку определение положения плоскостей для малоамплитудных разрывов является менее сложной задачей по сравнению с установлением векторов смещений по ним. На Ковыктинской площади использовался авторский вариант парагенетического анализа разрывов [Seminsky, 2014, 2015], который отличается типами парагенезисов, принимаемых в качестве исходных при реконструкции напряженного состояния. Это полные парагенезисы, являющиеся результатом постадийного разломообразования (см. рис. 2, а), в процессе которого при деформации скалывания происходит закономерная смена стресс-тензоров 2-го порядка.

Полный парагенезис разрывов для зоны скалывания, состоящий из магистрального сместителя (разлом 1-го порядка) и семи направлений разломов 2-го порядка (R, R', n, n', t, t' и T -типа), показан на рис. 2, б, в виде круговых диаграмм разрывных систем – трафаретов – на примере левого сдвига. Поскольку сдвиги, взбросы и сбросы в механическом отношении подобны (формируются при скалывании), для них эталонные трафареты были составлены аналогичным образом (рис. 6 в статье [Seminsky, 2014]). Метод заключается в сопоставлении эталонных трафаретов с диаграммами природных разрывных сетей, что в случае удовлетворительного совпадения позволяет получить для элементарного объема (коренной выход, блок пород) решение о его деформации в разломной зоне с определенной кинематикой и, соответственно, типе стресс-тензора. Полученные локальные решения выносятся на площадную схему (или 3D образ) изучаемого объекта. Затем по точкам с близкорасположенными однотипными решениями проводятся границы зон, субстрат которых деформировался в одинаковых условиях.

Далее для реконструкции типов полей напряжений, в которых на отдельных этапах тектогенеза формировалась структура изучаемого участка коры, проводится поранговый анализ выделенных разломных зон [Seminsky, 2014]. Обработка локальных решений позволяет получить реконструкции регионального, а затем и более низкого уровня. В итоге остается несколько решений (обычно 3–4), которые ввиду различия типов не могут развиваться в одно время, т.е. соответствуют разным этапам разломообразования. В заключение парагенетического анализа для каждого из этапов составляются схемы полей напряжений: из массива локальных решений выбирают и наносят на площадную схему (или 3D образ) изучаемого объекта те, которые в качестве стресс-тензоров 2-го порядка

могут иметь место в соответствующем поле напряжений 1-го порядка.

Разрывные структуры, являющиеся предметом парагенетического анализа, как правило, выделяются разными способами для отдельных уровней осадочного разреза, что иллюстрируется ниже на примере Ковыктинского участка.

4.2. Верхняя часть разреза осадочной толщи

Реконструкции напряженного состояния в приповерхностной части осадочного разреза проводились на основе анализа двух групп данных и описаны в предыдущей публикации [Seminsky et al., 2018]. Это геолого-структурная информация о разрывах и трещинах, задокументированных в редких обнажениях пород, что позволило лишь подтвердить решения, полученные по площадным материалам. Основу последних составила сеть разломных зон, представленных сгущениями линеаментов рельефа (см. рис. 1, б). В итоге парагенетического анализа этой сети было установлено, что в верхней части осадочного чехла проявлены как минимум три этапа тектогенеза: сжатие в направлении СЗ–ЮВ, сдвиг с меридиональной ориентировкой оси сжатия и широтным простираем осей растяжения, а также растяжение в направлении СЗ–ЮВ. Судя по литературным данным [Zamaraev et al., 1976; Sankov et al., 1997, 2017; Delvaux et al., 1997; Mats et al., 2001; Sizykh, 2001], именно эти обстановки привели к наиболее интенсивным деформациям коры в смежном Байкальском подвижном поясе в палеозое (сжатие), раннем (сдвиг) и позднем (растяжение) кайнозое.

4.3. Нижняя часть разреза осадочной толщи

Для глубоких частей платформенного чехла основой для парагенетического анализа могут служить материалы 3D электро- и сейсморазведки. Первый вид съемки покрывает Ковыктинский ЛУ фрагментарно [Buddo et al., 2018]. Как следствие, реконструкции, сделанные по сети зон повышенной электропроводности, использовались в качестве вспомогательных и в целом не противоречили решениям, полученным по разрывам, которые были выделены при помощи атрибутов из сейсмокуба для участка в целом. Азимут и угол падения таких разрывов представляли необходимую и достаточную информацию для применения авторского варианта парагенетического анализа, который позволил восстановить стресс-тензоры практически повсеместно.

Так, на Ковыктинской площади напряженное состояние определялось для локальных объемов (ячеек), размер которых составлял 5×5 км при глубине, равнявшейся мощности того осадочного комплекса, к которому принадлежала элементарная ячейка: верхнего солевого, нижнего солевого или подсолевого (всего 618 ячеек) (см. рис. 3). Пример реконструкции стресс-тензоров для одного из элементарных объемов показан на рис. 4. Вначале по элементам залегания разрывов, попавших в ячейку (рис. 4, а), строилась круговая

диаграмма (рис. 4, б). Далее она сопоставлялась с эталонными трафаретами (рис. 4, в, г). Эталон, наиболее подходящий по совокупности совпадающих систем разрывов, определял решение: напряженное состояние, которое послужило причиной их формирования, а также элементы строения и морфогенетический тип разломной зоны 1-го порядка. Для каждой ячейки обычно реконструировалось несколько вариантов решений (2–6), что свидетельствует о разновозрастных напряженных состояниях, имевших место в процессе тектонического развития изучаемого участка земной коры. Для иллюстрируемой здесь диаграммы их было два (рис. 4, д): поле сдвига и поле растяжения.

В общем, на Ковыктинском ЛУ реконструировано 1278 локальных решений, которые затем согласно методике парагенетического анализа [Seminsky, 2014, 2015] подвергались ранжированию. В итоге для осадочного чехла в целом было реконструировано четыре

динамических обстановки регионального уровня: I – сжатие в направлении СЗ–ЮВ, II – сжатие в субширотном направлении, III – сдвиг с ориентацией оси сжатия в субмеридиональном и оси растяжения в субширотном направлении, IV – растяжение в направлении СЗ–ЮВ. Для них на заключительном этапе строились карты распределения локальных стресс-тензоров (полей 2-го порядка), причем отдельно для каждого из трех изученных осадочных комплексов (рис. 5). С этой целью из общей совокупности локальных решений выбирались те, которые соответствуют по типу, т.е. были активны в рассматриваемом региональном поле напряжений. Они в определенной цветовой гамме наносились на карты соответствующих слоев – верхнего солевого, нижнего солевого и подсолевого комплекса. При этом в качестве двух- или трехмерной «подложки» может использоваться сеть разрывов, выделенных из сейсмокуба (рис. 5, полный набор обстановок),

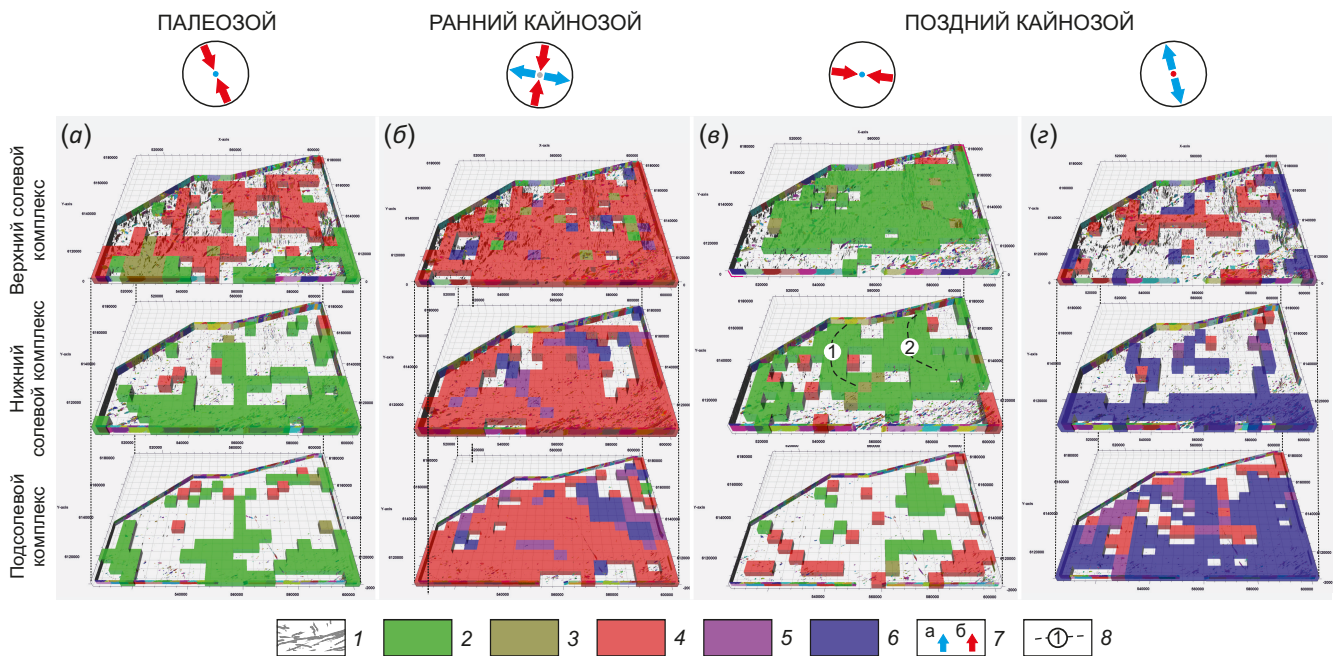


Рис. 5. Объемное изображение напряженно-деформированного состояния верхнего солевого, нижнего солевого и подсолевого комплексов осадочного чехла на Ковыктинском участке.

(а–г) – региональные разновозрастные поля напряжений, реконструированные по результатам парагенетического анализа разрывных сетей, выделенных из куба сейсмической информации: (а) – поле сжатия в направлении СЗ–ЮВ; (б) – поле сдвига с ориентацией оси сжатия в субмеридиональном и оси растяжения в субширотном направлении; (в) – поле сжатия в субширотном направлении; (г) – поле растяжения в направлении СЗ–ЮВ. 1 – разрывы «Ант-Трекинг» для соответствующего осадочного комплекса; 2–6 – типы локальных полей напряжений 1 и 2-го порядка, реконструированных в расчетных ячейках: 2 – сжатие, 3 – сжатие со сдвигом (транспрессия), 4 – сдвиг, 5 – растяжение со сдвигом (транстенсия), 6 – растяжение; 7 – положение субгоризонтальных осей главных нормальных напряжений растяжения (а) и сжатия (б); 8 – оси участков субширотного сжатия.

Fig. 5. A three-dimensional image of the stress-strain state of the upper salt, lower salt and subsalt complexes of the sedimentary cover in the Kovykta area.

(а–г) – regional stress fields of different ages reconstructed based on the results of paragenetic analysis of fracture networks extracted from a 3D seismic dataset: (а) – NW–SE compression field; (б) – shear field with a submeridional orientation of the compression axis and a sublatitudinal orientation of the extension axis; (в) – sublatitudinal compression field; (г) – NW–SE extension field. 1 – Ant-tracking faults for the corresponding sedimentary complex; 2–6 – types of local stress fields of the 1st and 2nd orders, reconstructed in the calculation cells: 2 – compression, 3 – compression with shear (transpression), 4 – shear, 5 – tension with shear (transtension), 6 – extension; 7 – position of subhorizontal axes of principal normal extension (а) and compression (б) stresses; 8 – axes of the sublatitudinal compression areas.

или зонно-блоковая структура, представленная осями разломных зон (см. [рис. 3](#), подсолевой комплекс, обстановка растяжения СЗ–ЮВ).

4.4. Выводы

Новая модификация парагенетического анализа, основанная на современных представлениях о структурных элементах разломных зон, позволила выделить для Ковыктинского ГКМ стресс-тензоры 1-го порядка, соответствующие главным этапам формирования ЗБС осадочного чехла. Ими являются поля сжатия ([рис. 5, а](#)), сдвига ([рис. 5, б](#)) и растяжения ([рис. 5, г](#)), которые были реконструированы как для верхней, так и для нижней части осадочной толщи. Эти поля соответствуют по типу главным этапам тектогенеза, интенсивно проявляющегося в осевой части смежного с платформой Байкальского подвижного пояса, т.е. по времени могут быть, соответственно, отнесены к палеозою, раннему и позднему кайнозою. В происхождении четвертого из реконструированных региональных полей – широтного сжатия ([рис. 5, в](#)) – существенную роль играет гравитационный фактор, поскольку соответствующие решения широко распространены в солевом комплексе. Деформации происходят на последнем отрезке геологической летописи, так как в рассматриваемом слое, судя по картам [рис. 5, в](#), и [рис. 5, г](#), данное поле «вытесняет» поле современного растяжения. Участки его проявления отличаются дугообразной формой, причем восточный имеет соответствующее отражение в разрывной структуре Большеириньского вала (зона 2 на [рис. 3](#) и [5, в](#)). Это в совокупности с наличием на востоке Ковыктинского участка локального поднятия в рельефе свидетельствует о течении пластичных пород от него на запад посредством перемещений по надвигам и послойным срывам.

Карты распределения полей напряжений, действующих в настоящее время ([рис. 5, в, г](#)), имеют практическое значение для решения вопросов, связанных с поиском на Ковыктинском ГКМ продуктивных залежей, а также с прогнозом мест безаварийного бурения скважин. Поскольку все материалы по напряженному состоянию и разрывной сети создаются в виде кубов информации в машиночитаемом виде, можно оперативно получить карту напряженно-деформированного состояния для любой части осадочного чехла. Так, например, карта продуктивного подсолевого комплекса (см. [рис. 3](#)) предоставляет дополнительный критерий выбора мест заложения эксплуатационных скважин, которыми являются участки растяжения, поскольку из уже пройденных выработок именно там располагается 78 % скважин с дебитом свыше 100 тыс. м³/сут. При этом для планируемой скважины можно показать интервалы предполагаемых осложнений, которыми являются места ее пересечения с разрывами, активными в указанных полях напряжений.

Необходимо отметить, что выше намечен лишь общий подход к выделению проблемных интервалов разреза, который в отношении Ковыктинского участка

соответствует детальности 5×5 км в плане. Для решения производственных задач, связанных с выбором площадок строительства скважин, этого недостаточно. Вместе с тем разработанная методика позволяет построить объемные модели напряженно-деформированного состояния для отдельных участков с той детальностью, которую обеспечивают ключевые геофизические материалы, и прежде всего данные сейсморазведки. Таким образом, проведение исследований в укрупненном масштабе даст возможность получить дополнительное обоснование для выбора мест бурения скважин, которые могут быть пройдены без осложнений и с перспективой обнаружения скопленных природного газа.

5. МЕХАНИЗМЫ РАЗЛОМООБРАЗОВАНИЯ В ОСАДОЧНОМ ЧЕХЛЕ

5.1. Тектонофизические предпосылки исследований

Тектонофизика обладает большим набором методов моделирования тектонических процессов, которые можно разделить на две большие группы: численные и аналоговые. В первой группе модель и условия ее нагружения задаются при помощи системы уравнений, а во второй – на образец из эквивалентного материала (желатин, глиняные пасты, пластилин, воск, горная порода и пр.) осуществляется силовое воздействие, соответствующее природной динамической обстановке. В соответствии с полученными для Ковыктинского ГКМ данными эксперименты проводились с использованием аналоговых упругих (желатиновые студни) и упругопластичных (пасты бурой глины, пластилин и др.) моделей на установках «Полярископ-поляриметр» и «Разлом» без учета силы тяжести, а также на центрифуге, позволяющей оценить роль гравитационного фактора в структурообразовании. Техника проведения экспериментов описана в специальных публикациях [Osokina, Tsvetkova, 1979; Sherman et al., 1983, 1991, 1992, 1994].

Результаты моделирования представлены ниже для решения ключевых вопросов формирования структуры Ковыктинского ГКМ, таких как реальность предполагаемых для последнего тектонического этапа механизмов структурообразования, специфика кайнозойского напряженного состояния, влияние реологической слоистости осадочного чехла на характер разломообразования.

5.2. Моделирование механизмов разломообразования

Тектонические обстановки разломообразования, установленные для района Ковыктинского ГКМ, являются отражением на платформе процессов деструкции, которые на каждом из этапов тектогенеза протекали с высокой интенсивностью в смежном Байкальском подвижном поясе. Механизмы разломообразования подтверждены экспериментальными исследованиями, результаты которых могут быть привлечены

и для описания процесса на краевой платформенной территории.

Сжатие, охватившее юг Сибирского кратона в палеозое, как наиболее распространенный процесс взаимодействия крупных литосферных блоков, не раз воспроизводилось в аналоговых экспериментах [Davis et al., 1983; Peltzer et al., 1984; Mandl, 1988; McClay, 1991], в т.ч. и авторами статьи [Sherman et al., 1994; Seminsky, 2003]. Под действием бокового давления деформации распространяются на платформу, формируя пояс разломно-складчатых структур, причем постепенное затухание процесса выражается не только в интенсивности деформации, но и в изменении его характера: взбросы – надвиги – горизонтальные срывы. Именно послынные срывы вместе с субвертикальными малоамплитудными сдвигами представляют главный парагенезис разломных зон на удалении в сотни километров от границы кратона. Приложение экспериментальных данных к Ковыктинской площади позволяет объяснить наличием крупных срывов деление осадочного чехла на описанные ранее структурно-вещественные комплексы – подсолевой, нижний солевой, верхний солевой и надсолевой.

Кайнозойские тектонические обстановки сдвига и растяжения, сменяющиеся во времени на Ковыктинской площади, могут быть объяснены динамикой развития единого механизма деформации литосферы, действующего при формировании Байкальского рифта как гигантской структуры типа пулл-апарт [Seminsky, 2009]. В проведенных экспериментах однослойная модель из упругопластичной глинистой пасты накладывалась на два штампа. Один из них смещался по типу простого сдвига в горизонтальном направлении и на контакте со вторым штампом имел изгиб, аналогичный по форме прибайкальскому отрезку краевого шва Сибирской платформы (желтый пунктир на рис. 6, б). При моделировании впервые была достигнута высокая степень подобия морфологии и взаимного расположения впадин Байкальской рифтовой зоны (рис. 6), а также воспроизведена главная закономерность ее развития во времени: стадийность формирования с переходами от подготовительного сдвигового к собственно рифтовому этапу, а затем от «медленного» к «быстрому рифтингу» на заключительных этапах структурообразования [Mats et al., 2001; Logatchev, 2003; Petit, Deverchere, 2006]. Рассматривая результаты эксперимента в применении к Ковыктинскому ЛУ, можно видеть, что он, судя по рис. 6, должен принадлежать к периферии зоны деструкции. Следовательно, воспроизведенный в модели механизм структурообразования является реальной причиной широкого распространения в платформенном чехле обстановок сдвига (см. рис. 5, б) и растяжения (см. рис. 5, г).

Оставшаяся динамическая обстановка регионального уровня – субширотное сжатие – связывается с влиянием гравитации и, следовательно, должна объясняться посредством привлечения данных моделирования на «Центрифуге». Классическим описанием

подобных экспериментов считаются работы Х. Рамберга и В.Г. Гутермана [Ramberg, 1970; Guterman, 1987], часть из которых была посвящена изучению деформаций в разрезах, содержащих слои пластичных пород. Было показано, что отклонения их залегания от горизонтали в первые градусы достаточно для инициации перемещения как вышележащих толщ по солевому слою, так и самого слоя по подстилающим породам. Таким образом, существование у восточной границы Ковыктинского участка локального поднятия в рельефе может быть причиной гравитационного течения соленосных толщ на запад.

Действие массовых сил является одним из факторов, осложняющих тектоническое строение платформенных толщ и придающих определенную специфику дислоцированности отдельных осадочных комплексов. Еще одним нетектоническим фактором является различная компетентность к деформации пород, представляющих осадочный разрез, что существенным образом затрудняет трассирование дизъюнктивов на сейсмических разрезах. Тектонофизическое моделирование является эффективным методом, результаты которого наглядно демонстрируют различную выраженность разломной зоны в смежных слоях, отличающихся степенью пластичности. Рис. 7 иллюстрирует деформационную реакцию более (влажная глина) и менее (влажный песок) пластичного «чехла» при вертикальном движении блока по сместителю в «фундаменте». Разрывы в упругопластичном материале (рис. 7, а, в) начинают проникать от основания модели к ее поверхности в пределах широкой зоны, причем для формирования магистрального шва требуются существенные амплитуды вертикального перемещения. В более хрупком материале (рис. 7, б, г), напротив, модель быстро разрушается одним разрывом при небольшой амплитуде смещения. Это и является причиной сегментации разломной зоны (рис. 7, д): в компетентных слоях она выражается в виде отчетливо диагностируемых крупных разрывов, а в глинистых разностях – участками повышенной трещиноватости, не выделяющимися в сейсмических атрибутах и, тем более, – смещениями на сейсмических разрезах. В данном случае внешне бескорневая структура не является таковой по сути, так как обусловлена недостатком «чувствительности» современных способов выделения разрывов.

5.3. Моделирование напряженного состояния

Эксперименты по моделированию поля напряжений, как правило, проводятся на оптически активном материале (желатин), позволяющем установить распределение стресса в модели, нагруженной подобно природному аналогу. Для решения проблем нефтегазовой геологии может воспроизводиться напряженное состояние складчатых структур [Zubkov, Bondarenko, 1999; Zubkov, 2019], хотя метод наиболее эффективен для моделей с разрывами, которые обычно задаются простыми разрезами [Osokina, Tsvetkova, 1979]. Новизной экспериментов, проводимых в применении

Ковыктинского ЛУ [Seminsky et al., 2018], было использование процедуры «залечивания» разрезов менее вязким материалом, что позволяет исследовать распределения напряжений для зонно-блоковых структур. Результатом эксперимента являются цветные картины, получаемые при исследовании нагруженной модели в проходящем поляризованном свете.

Как было показано в статье [Seminsky et al., 2018], материалы оптического моделирования подтверждают и уточняют природные оценки степени активности

разломных зон на разных этапах тектогенеза, позволяя разделить их на сегменты, что важно для оценки степени проницаемости. Более того, они дают возможность проанализировать напряженное состояние в блоках, которым свойственно неравномерное распределение стресса. Сопоставление полученной картины с продуктивностью и проявлением аномально высоких пластовых давлений в скважинах Ковыктинского участка свидетельствует, что в первом приближении области повышенных дебитов тяготеют к пониженным

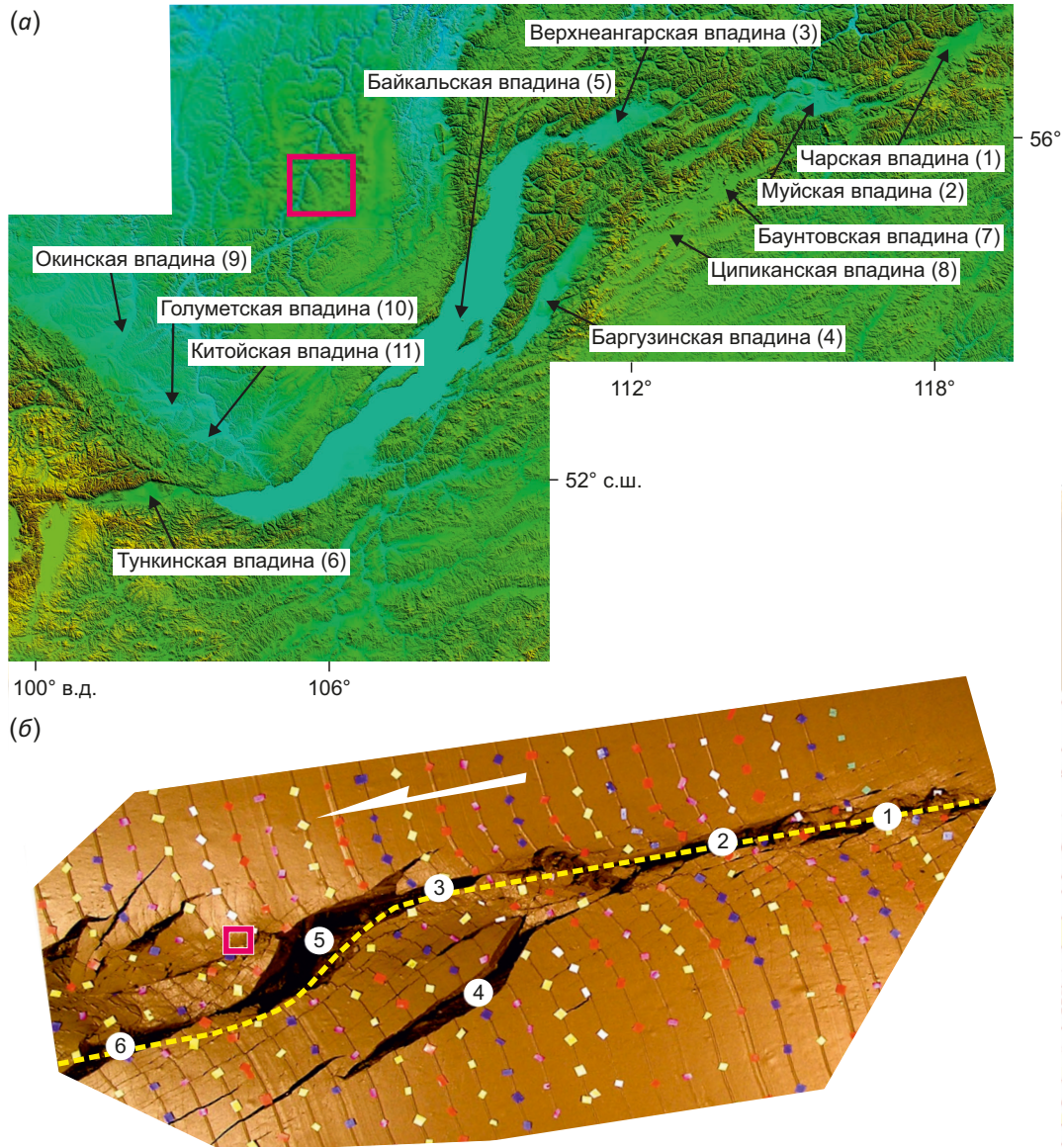


Рис. 6. Разломы и впадины Байкальской рифтовой зоны и юга Сибирского кратона на цифровой модели рельефа (а) в сравнении с аналогичными структурами, воспроизведенными в упругопластичной модели (б). Желтой пунктирной линией показано примерное положение края подвижного штампа экспериментальной установки на момент фотосъемки, стрелкой – направление его перемещения. Цветные квадратики на поверхности модели маркируют реперные линии. Малиновый прямоугольник – Ковыктинский участок.

Fig. 6. Faults and depressions of the Baikal rift zone and the southern Siberian craton on a digital elevation model (a) in comparison with similar structures based on the elastoplastic model (b). The yellow dotted line shows the approximate position of the edge of the movable stamp of the experimental device at the moment of taking a photograph, and the arrow shows the direction of its movement. Colored squares on the model surface mark the reference lines. The crimson rectangle is the Kovykta area.

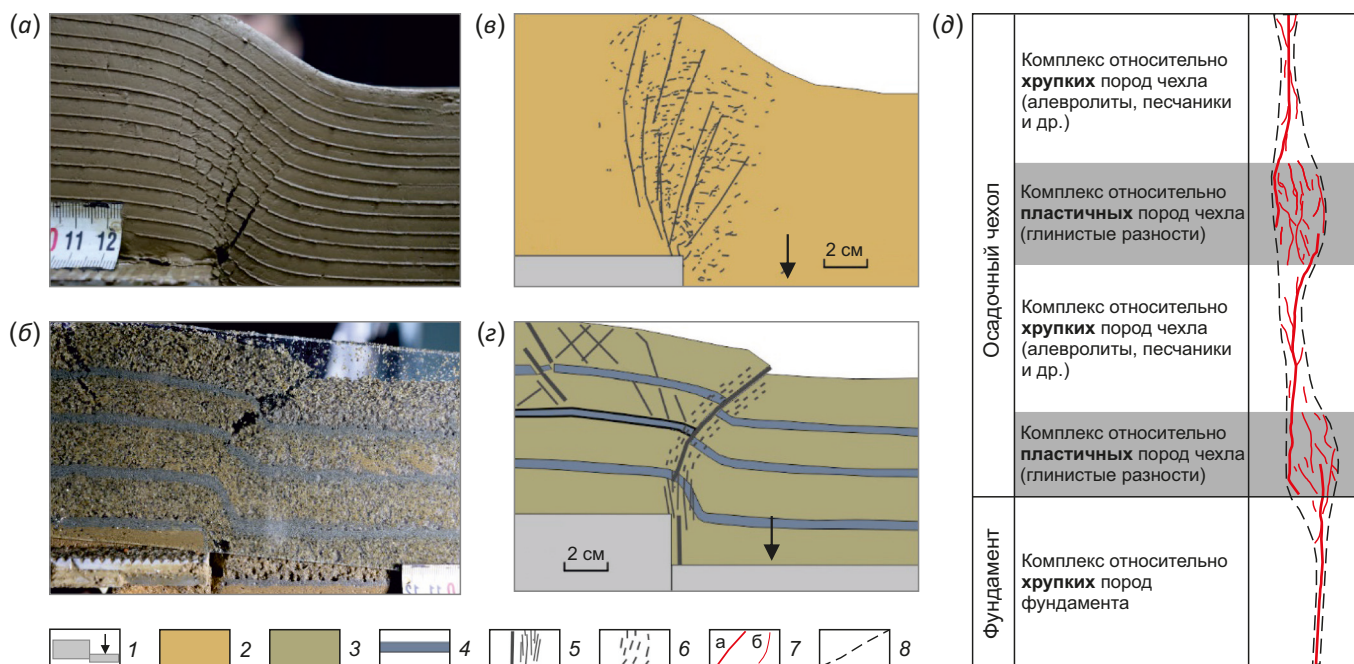


Рис. 7. Строение зоны разлома в средах с разной реологией. (а-б) – зоны разрывов, образовавшиеся за определенное время в чехле над активным разломом фундамента в моделях из глины (а) и влажного песка (б). (в-з) – схемы разрывов в моделях из глины (в) и влажного песка (з). (д) – принципиальная схема внутреннего строения разлома в реологически неоднородном платформенном разрезе. 1 – штампы экспериментальной установки (стрелка – направление движения активного штампа); 2-3 – модели из глины (2) и песка (3); 4 – маркеры; 5 – разрывы; 6 – область разрыхления модельного материала; 7 – крупные (а) и мелкие (б) разрывы; 8 – границы разломной зоны.

Fig. 7. The structure of the fault zone in different rheological environments. (а-б) – fault zones formed over a certain time in active basement-fault cover in clay (а) and wet sand (б) models. (в-з) – fracture patterns in clay (в) and wet sand (з) models. (д) – principle scheme of the internal structure of a fault in a rheologically heterogeneous platform section. 1 – stamps of the experimental setup (an arrow shows the direction of movement of the active stamp); 2-3 – clay (2) and sand (3) models; 4 – markers; 5 – fractures; 6 – area of loosening of the model material, 7 – large (а) and small (б) fractures; 8 – boundaries of the fault zone.

концентрациям напряжений и участкам растяжения, а АВПД – к местам их повышения и к градиентным областям. Таким образом, результаты оптического моделирования могут дополнительно использоваться при прогнозе мест бурения разведочных и эксплуатационных скважин.

5.4. Выводы

Моделирование является эффективным методом исследования механизмов разрывообразования и напряженного состояния породного массива на месторождениях углеводородов, залегающих подобно Ковыктинскому ГКМ. Обстановки бокового сжатия, а также сдвига с последующим растяжением, воспроизведенные в моделях, охватывают область, которая в природе соответствует краевой платформенной территории. Кроме самого факта их существования, эксперименты наглядно показывают динамику структурообразования и специфику поля напряжений в целом, а также их детали, в частности специфическую выраженность разломных зон в разных по компетентности слоях осадочного чехла. Согласно экспериментальным данным, реологическая расслоенность является причиной не только неравномерной нарушенности субстрата зон,

но и появления истинно бескорневых структур. Они формируются в процессе гравитационного скольжения пластичных соленосных пород при их минимальном отклонении от горизонтального залегания.

6. ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Применение современных приемов и способов тектонофизического анализа разнотипной геолого-геофизической информации позволило установить главные закономерности разломного строения и напряженно-состояния платформенного чехла на Ковыктинском ГКМ. Материалы цитированных в статье публикаций свидетельствуют о том, что подобные закономерности справедливы и для других месторождений углеводородного сырья, характеризующихся сложным строением. Это дает возможность обобщить их в виде тектонофизической модели осадочной толщи, вмещающей залежи углеводородов. Содержанием модели является характеристика иерархичной структуры осадочного чехла с акцентом на специфике напряженного состояния и механизмах ее формирования под действием сил различного происхождения.

Дизъюнктивная структура платформенного чехла является зонно-блоковой, т.е. представляет иерархию

блоков, которая образована сетью в основном субвертикальных и субгоризонтальных зон сгущения сравнительно непротяженных разрывов. Сеть наиболее крупных субвертикальных зон является отражением разломно-блоковой структуры фундамента. В его пределах большинство разломов выражено сместителями магистрального типа (1-й порядок), тогда как в чехле это широкие зоны, внутренняя структура которых находится на ранних стадиях развития, т.е. представлена разрывами 2-го порядка, густой сетью трещин, а также складчатыми формами. При этом одна и та же зона проявляется фрагментами с более или менее зрелой внутренней структурой в смежных, но отличающихся по реологии слоях. Субгоризонтальные зоны послонных срывов и надвигов, тяготея к прослоям пластичных пород (соли, глины), делят платформенный чехол на структурно-вещественные комплексы, строение которых может отличаться по степени нарушенности, типу разрывных сетей и напряженному состоянию вследствие воздействия сил различной природы и направленности.

Состояние зонно-блоковой структуры и поля напряжений осадочного чехла определяется совокупным влиянием сил тектонического происхождения, характеризующихся региональным распространением, а также гравитации, проявление которой может быть связано и с региональными, и с локальными источниками напряжений. Тектоническое воздействие на чехол осуществляется через фундамент со стороны смежных подвижных поясов, т.е. обусловлено историей деформаций в их пределах. Гравитационные эффекты наиболее интенсивно проявляются в пластичных комплексах и представляют результат скольжения пород от поднятий к понижениям в рельефе с образованием бескорневых структур.

Представленная в тектонофизической модели система субвертикальных зон в совокупности с реологической расслоенностью определяет неоднородность чехла в плане напряженного состояния, степени нарушенности и, как следствие, проницаемости для жидких и газообразных углеводородов. При этом на месторождениях со сложным строением необходимо исходить из трещинного или трещинно-порового состояния коллектора. В подобных условиях наиболее проницаемыми являются участки растяжения породного массива, к которым в зонно-блоковой структуре относятся квадранты растяжения в местах сочленения активных разломных зон, а в их пределах – подзона вторичных разрывов и повышенной трещиноватости.

Описательная часть тектонофизической модели сопровождается серией объемных графических представлений о строении и полях напряжений на разных масштабных уровнях и отдельных этапах тектогенеза, примерами которых для Ковыктинского участка являются рис. 1, 3 и 5. В настоящее время эти материалы могут быть оперативно получены из кубов соответствующей информации в рамках программных комплексов типа «Petrel», «Kingdom» и др.

В целом, в статье представлено содержание методического подхода, позволяющего построить для участков чехла со сложным строением объемные модели напряженно-деформированного состояния с той степенью детальности, которую обеспечивают ключевые геофизические данные, и прежде всего материалы сейсморазведки. В прикладном отношении это дает возможность получить дополнительное (к уже имеющимся на производстве) обоснование для выбора мест бурения разведочных и эксплуатационных скважин, которые могут быть пройдены без осложнений и с перспективой обнаружения скоплений природного газа. Кроме того, опыт применения данного подхода на различных месторождениях позволит получить оригинальные материалы для решения на новом уровне проблемных вопросов миграции и происхождения углеводородов.

7. БЛАГОДАРНОСТИ

Авторы благодарны директору Института земной коры СО РАН, чл.-корр. РАН Д.П. Гладкочубу и генеральному директору ООО «СИГМА-ГЕО», к.т.н. Ю.А. Агафонову за всестороннюю поддержку исследования на всех этапах его реализации, а также А.В. Черемных, А.Г. Вахромееву, В.В. Огигенину, В.А. Санькову, А.А. Боброву, С.А. Сверкунову, Н.В. Мисюркеевой, И.А. Шелухову и А.В. Парфееву за помощь в сборе и обработке комплекса геолого-геофизических данных по Ковыктинскому ГКМ.

8. ЗАЯВЛЕННЫЙ ВКЛАД АВТОРОВ / CONTRIBUTION OF THE AUTHORS

Все авторы внесли эквивалентный вклад в подготовку рукописи, прочли и одобрили финальную версию перед публикацией.

All authors made an equivalent contribution to this article, read and approved the final manuscript.

9. РАСКРЫТИЕ ИНФОРМАЦИИ / DISCLOSURE

Авторы заявляют об отсутствии конфликта интересов, связанного с этой рукописью.

The authors declare that they have no conflicts of interest relevant to this manuscript.

10. ЛИТЕРАТУРА / REFERENCES

Aarre V., Astratti D., Dayyni T.N.A.A., Mahmoud S.L., Clark A.B.S., Stellas M.J., Stringer J.W., Toelle B.E., Vejbak O.V., White G., 2012. Seismic Detection of Subtle Faults and Fractures. *Oilfield Review* 24 (2), 28–43.

Basir H.M., Javaherian A., Yarak M.T., 2013. Multi-Attribute Ant-Tracking and Neural Network for Fault Detection: A Case Study of an Iranian Oilfield. *Journal of Geophysics and Engineering* 10 (1), 015009. <https://doi.org/10.1088/1742-2132/10/1/015009>.

Baudon C., Cartwright J., 2008. Early Stage Evolution of Growth Faults: 3D Seismic Insights from the Levant Basin, Eastern Mediterranean. *Journal of Structural Geology* 30 (7), 888–898. <https://doi.org/10.1016/j.jsg.2008.02.019>.

Buddo I.V., Misurkeeva N.V., Agafonov Y.A., Smirnov A.S., 2016. Optimal Sequence of Gas Field Investigations from the Kovycta Gas-Condensate Field. In: Proceedings of 7th EAGE Saint Petersburg International Conference and Exhibition (April, 2016, Saint Petersburg). EAGE, cp-480-00084. <https://doi.org/10.3997/2214-4609.201600167>.

Buddo I.V., Shelokhov I.A., Misyurkeeva N.V., Agafonov Y.A., 2021. Transient Electromagnetic Sounding in 2D, 3D and 4D Modes: Sequence of Geological Exploration Activities. *Geodynamics & Tectonophysics* 12 (3s), 715–730 (in Russian) [Буддо И.В., Шелохов И.А., Мисюркеева Н.В., Агафонов Ю.А. Электромагнитные исследования методом ЗСБ 2D, 3D, 4D: последовательность постановки геологоразведочных работ // Геодинамика и тектонофизика. 2021. Т. 12. № 3с. С. 715–730]. <https://doi.org/10.5800/GT-2021-12-3s-0549>.

Buddo I.V., Smirnov A.S., Misyurkeeva N.V., Shelokhov I.A., Agafonov Y.A., Lushev M.A., Korotkov S.A., Trjasin E.Ju., 2018. Integration of Geomechanical, Geoelectric and Structural-Tectonic Models for the Kovycta Gas Condensate Field Geological Model Improvement. In: Saint Petersburg 2018. Innovations in Geosciences – Time for Breakthrough. Proceedings of 8th International Conference & Exhibition (April 9–12, 2018, Saint Petersburg). EAGE, p. 1–6. <https://doi.org/10.3997/2214-4609.201800285>.

Bull S., Cartwright J., Huuse M., 2009. A Review of Kinematic Indicators from Mass-Transport Complexes Using 3D Seismic Data. *Marine and Petroleum Geology* 26 (7), 1132–1151. <https://doi.org/10.1016/j.marpetgeo.2008.09.011>.

Davis D., Supple J., Dahlen F.A., 1983. Mechanics of Fold and Thrust Belts and Accretionary Wedges. *Journal of Geophysical Research: Solid Earth* 88 (B2), 1153–1172. <https://doi.org/10.1029/JB088iB02p01153>.

Delvaux D., Moyes R., Stapel G., Petit C., Levi K., Miroshnichenko A., Ruzhich V., Sankov V., 1997. Paleostress Reconstruction and Geodynamics of the Baikal Region, Central Asia. Part II: Cenozoic Rifting. *Tectonophysics* 282, 1–38. [https://doi.org/10.1016/S0040-1951\(97\)00210-2](https://doi.org/10.1016/S0040-1951(97)00210-2).

Dubrovin M.A., 1979. Salt Tectonics of the Upper Lena Basin of the Siberian Platform. Nauka, Novosibirsk, 94 p. (in Russian) [Дубровин М.А. Соляная тектоника Верхне-Ленской впадины Сибирской платформы. Новосибирск: Наука, 1979. 94 с.].

Etiopie G., Martinelli G., 2002. Migration of Carrier and Trace Gases in the Geosphere: An Overview. *Physics of the Earth and Planetary Interiors* 129 (3–4), 185–204. [https://doi.org/10.1016/S0031-9201\(01\)00292-8](https://doi.org/10.1016/S0031-9201(01)00292-8).

Glukhmanchuk E.D., Vasilevskiy A.N., 1998. Method of Detailed Analysis of the Deformation Field Structure from Seismic Data and Some Results of Its Application in the Fields of West Siberia. In: *Geophysical Methods of Studying the Earth's Crust*. SB RAS Publishing House, Novosibirsk, p. 131–140 (in Russian) [Глухманчук Е.Д., Василевский А.Н. Методика детального анализа структуры поля деформаций по данным сейсморазведки и некоторые результаты ее применения на месторождениях Западной Сибири // Геофизические методы изучения земной коры. Новосибирск: Изд-во СО РАН, 1998. С. 131–140].

Glukhmanchuk E.D., Vasilevskiy A.N., 2013. Description of Fracture Zones Based on the Structural Inhomogeneity of the Reflector Deformation Field. *Russian Geology and Geophysics* 54 (1), 82–86. <https://doi.org/10.1016/j.rgg.2012.12.007>.

Gogonenkov G.N., Timurzиеv A.I., 2012. Strike-Slip Faulting in the West Siberian Platform: Insights from 3D Seismic Imagery. *Comptes Rendus Geoscience* 344 (3–4), 214–226. <https://doi.org/10.1016/j.crte.2011.09.010>.

Gorlov I.V., Smirnov A.S., Ignatyev S.F., Vakhromeev A.G., Pospeev A.V., Misyurkeeva N.V., Agafonov Yu.A., Buddo I.V., 2016. The New Promising Reservoirs in the Cambrian Sediments at the Kovikta Gas-Condensate Field. In: *GeoBaikal 2016. Expanding the Horizons*. Proceedings of the 4th International Scientific and Practical Conference (August 22–26, 2016, Irkutsk). EAGE, p. 1–5 (in Russian) [Горлов И.В., Смирнов А.С., Игнатьев С.Ф., Вахромеев А.Г., Поспеев А.В., Мисюркеева Н.В., Агафонов Ю.А., Буддо И.В. Новые газоперспективные объекты в кембрийских отложениях Ковыктинского ГКМ // ГеоБайкал 2016: Расширяя горизонты: Материалы 4-ой международной научно-практической конференции (22–26 августа 2016 г., Иркутск). EAGE, 2016. С. 1–5]. <https://doi.org/10.3997/2214-4609.201601706>.

Guterman V.G., 1987. *Tectogenetic Mechanisms*. Naukova Dumka, Kiev, 172 p. (in Russian) [Гутерман В.Г. Механизмы тектогенеза. Киев: Наукова думка, 1987. 172 с.].

Gzovsky M.V., 1975. *Fundamentals of Tectonophysics*. Nauka, Moscow, 536 p. (in Russian) [Гзовский М.В. Основы тектонофизики. М.: Наука, 1975. 536 с.].

Harding T.P., 1974. Petroleum Traps Associated with Wrench Faults. *AAPG Bulletin* 58 (7), 1290–1304. <https://doi.org/10.1306/83D91669-16C7-11D7-8645000102C1865D>.

Harding T.P., Lowel J.D., 1979. Structural Style, Their Plate Tectonic Habitats and Hydrocarbon Traps in Petroleum Provinces. *AAPG Bulletin* 63 (7), 1016–1059. <https://doi.org/10.1306/2F9184B4-16CE-11D7-8645000102C1865D>.

Hu Sh., Alves T.M., Omosanya K.O., Li W., 2021. Geometric and Kinematic Analysis of Normal Faults Bordering Continental Shelves: A 3D Seismic Case Study from the Northwest South China Sea. *Marine and Petroleum Geology* 133, 105263. <https://doi.org/10.1016/j.marpetgeo.2021.105263>.

Iacopini D., Butler R.W.H., Purves S., McArdle N., De Freslon N., 2016. Exploring the Seismic Expression of Fault Zones in 3D Seismic Volumes. *Journal of Structural Geology* 89, 54–73. <http://doi.org/10.1016/j.jsg.2016.05.005>.

Ilyin A.I., Vakhromeev A.G., Misurkeeva N.V., Buddo I.V., Agafonov Yu.A., Pospeev A.V., Smirnov A.S., Gorlov I.V., 2016. A New Approach to Predicting Abnormally High Reservoir Pressure in the Cambrian Carbonate Rapa-Bearing Reservoirs of the Kovycta Gas Condensate Field. In: *GeoBaikal 2016. Expanding the Horizons*. Proceedings of the 4th International Scientific and Practical Conference (August 22–26, 2016, Irkutsk). EAGE, p. 1–5 (in Russian) [Ильин А.И., Вахромеев А.Г., Мисюркеева Н.В., Буддо И.В., Агафонов Ю.А.,

Поспеев А.В., Смирнов А.С., Горлов И.В. Новый подход к прогнозу АВПД в карбонатных рапоносных коллекторах кембрия на Ковыктинском ГКМ // ГеоБайкал 2016: Расширяя горизонты: Материалы 4-й международной научно-практической конференции (22–26 августа 2016 г., Иркутск). EAGE, 2016. С. 1–5]. <https://doi.org/10.3997/2214-4609.201601692>.

Interpreter's Guide to Seismic Attributes, 2007. Petrel 2007. Schlumberger Ltd, Stavanger, 119 p. (in Russian) [Руководство по интерпретации сейсмических атрибутов. Petrel 2007. Ставангер: Шлюмберге, 2007. 119 с.].

Ioannides K., Papachristodoulou C., Stamoulis K., Karamanis D., Pavlides S., Chatzipetros A., Karakala E., 2003. Soil Gas Radon: A Tool for Exploring Active Fault Zones. Applied Radiation and Isotopes 59 (2–3), 205–213. [https://doi.org/10.1016/S0969-8043\(03\)00164-7](https://doi.org/10.1016/S0969-8043(03)00164-7).

Jackson C.A.-L., Rotevatn A., 2013. 3D Seismic Analysis of the Structure and Evolution of a Salt-Influenced Normal Fault Zone: A Test of Competing Fault Growth Models. Journal of Structural Geology 54, 215–234. <http://doi.org/10.1016/j.jsg.2013.06.012>.

Khair H.A., Cooke D., Backé G., King R., Hand M., Tingay M., Holford S., 2012. Subsurface Mapping of Natural Fracture Networks; a Major Challenge to Be Solved. In: Case Study from the Shale Intervals in the Cooper Basin, South Australia. Proceedings of the Thirty-Seventh Workshop on Geothermal Reservoir Engineering (January 30 – February 1, 2012). Stanford University, California, USA, p. 1085–1092.

Khrenov P.M. (Ed.), 1982. Map of Faults in the Southern East Siberia. Scale 1:1500000. VSEGEI, Leningrad (in Russian) [Карта разломов юга Восточной Сибири. Масштаб 1:1500000 / Ред. П.М. Хренов. Л.: ВСЕГЕИ, 1982].

King C.-Y., King B.-S., Evans W.C., Zhang W., 1996. Spatial Radon Anomalies on Active Faults in California. Applied Geochemistry 11 (4), 497–510. [https://doi.org/10.1016/0883-2927\(96\)00003-0](https://doi.org/10.1016/0883-2927(96)00003-0).

Kontorovich A.E., Eder L.V., 2015. A New Paradigm of the Development Strategy for the Mineral Resource Base of the Oil Producing Industry in the Russian Federation. Mineral Resources of Russia. Economics and Management 5, 8–17 (in Russian) [Конторович А.Э., Эдер Л.В. Новая парадигма стратегии развития сырьевой базы нефтедобывающей промышленности Российской Федерации // Минеральные ресурсы России. Экономика и управление. 2015. № 5. С. 8–17].

Koronovsky N.V., Gogonenkov G.N., Goncharov M.A., Timurziev A.I., Frolova N.S., 2009. The Role of Shear along the Horizontal Plane in the Formation of Propeller-Shaped Structures. Geotectonics 5, 50–64 (in Russian) [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].

Logachev N.A. (Ed.), 1983. Neotectonic Map of the Baikal-Amur Mainline. Scale 1:3000000. IEC SB RAS, Irkutsk (in Russian) [Карта неотектоники региона Байкало-Амурской магистрали. Масштаб 1:3000000 / Ред. Н.А. Логачев. Иркутск: ИЗК СО РАН, 1983].

Logachev N.A. (Ed.), 1984. Neotectonic Map of Pribaikalye and Trans-Baikal Area. Scale 1:2500000. IEC SB RAS, Irkutsk (in Russian) [Карта неотектоники Прибайкалья и Забайкалья. Масштаб 1:2500000 / Ред. Н.А. Логачев. Иркутск: ИЗК СО РАН, 1984].

Logatchev N.A., 2003. History and Geodynamics of the Baikal Rift. Russian Geology and Geophysics 4 (5), 391–406 (in Russian) [Логачев Н.А. История и геодинамика Байкальского рифта // Геология и геофизика. 2003. Т. 44. № 5. С. 391–406].

Lombardi S., Voltattorni N., 2010. Rn, He and CO₂ Soil Gas Geochemistry for the Study of Active and Inactive Faults. Applied Geochemistry 25 (8), 1206–1220. <https://doi.org/10.1016/j.apgeochem.2010.05.006>.

Malykh A.V., 1985. Tectonic Stress Fields in the Nepsky and Sosninsky Folds of the Southern Siberian Platform. Russian Geology and Geophysics 6, 31–37 (in Russian) [Малых А.В. Поля тектонических напряжений в складках Непской и Соснинской зон складчатости юга Сибирской платформы // Геология и геофизика. 1985. № 6. С. 31–37].

Malykh A.V., Zamaraev S.M., Ryazanov G.V., Geletii N.K., 1987. Tectonics of the Central Nepsky Arch. Nauka, Novosibirsk, 81 p. (in Russian) [Малых А.В., Замараев С.М., Рязанов Г.В., Гелетий Н.К. Тектоника центральной части Непского свода. Новосибирск: Наука, 1987. 81 с.].

Mandl G., 1988. Mechanics of Tectonic Faulting. Models and Basic Concepts. Elsevier, Amsterdam, 407 p.

Mats V.D., Ufimtsev G.F., Mandelbaum M.M., Alakshin A.M., Pospeev A.V., Shimaraev M.N., Khlystov O.M., 2001. The Cenozoic Baikal Rift Basin: Its Structure and Geological History. GEO, Novosibirsk, 252 p. (in Russian) [Мац В.Д., Уфимцев Г.Ф., Мандельбаум М.М., Алакшин А.М., Поспеев А.В., Шимараев М.Н., Хлыстов О.М. Кайнозой Байкальской рифтовой впадины: строение и геологическая история. Новосибирск: Гео, 2001. 252 с.].

McClay K.R. (Ed.), 1991. Thrust Tectonics. Chapman and Hall, London, 444 p.

Migur'sky A.V., Staroseltsev V.S., 1989. Nappe Structure of the Junction Zone of the Siberian Platform with the Baikal-Patom Highlands. Soviet Geology 7, 9–15 (in Russian) [Мигурский А.В., Старосельцев В.С. Шарьяжное строение зоны сочленения Сибирской платформы с Байкало-Патомским нагорьем // Советская геология. 1989. № 7. С. 9–15].

Mushin I.A., Korolkov Yu.S., Chernov A.A., 2001. Identification and Mapping of Disjunctive Dislocations by Geophysical Survey Methods. Nauchny Mir, Moscow, 120 p. (in Russian) [Мушин И.А., Корольков Ю.С., Чернов А.А. Выявление и картирование дизъюнктивных дислокаций методами разведочной геофизики. М.: Научный мир, 2001. 120 с.].

Osokina D.N., Tsvetkova N.Yu., 1979. A Method for Modeling Local Stress Fields near Tectonic Faults and in Earthquake Sources. Stress and Deformation Fields in the Lithosphere. Nauka, Moscow, p. 139–162 (in Russian) [Осокина Д.Н., Цветкова Н.Ю. Метод моделирования локальных полей напряжений в окрестностях тектонических разрывов и

в очагах землетрясений // Поля напряжений и деформаций в литосфере. М.: Наука, 1979. С. 139–162].

Pedersen S.I., Randen T., Sonneland L., Steen O., 2002. Automatic Fault Extraction Using Artificial Ants. In: Expanded Abstracts of the 72nd SEG Annual Meeting (October 6–11, 2002, Salt Lake City, USA). SEG, p. 512–515. <https://doi.org/10.1190/1.1817297>.

Peltzer G., Gillet P., Tapponnier P., 1984. Formation Des Failles Un Matériau Modèle: La Plastiline. Bulletin de la Société Géologique de France S7-XXVI (1), 161–168. <https://doi.org/10.2113/gssgfbull.S7-XXVI.1.161>.

Petit C., Deverchere J., 2006. Structure and Evolution of the Baikal Rift: A Synthesis. *Geochemistry, Geophysics, Geosystems* 7, Q11016. <https://doi.org/10.1029/2006GC001265>.

Ramberg H., 1970. Gravity, Deformation and the Earth's Crust, as Studied by Centrifuged Models. Mir, Moscow, 224 p. (in Russian) [Рамберг Х. Моделирование деформаций земной коры с применением центрифуги. М.: Мир, 1970. 224 с.].

Reeve M.T., Bell R.E., Duffy O.B., Jackson C.A.-L., Sansom E., 2015. The Growth of Non-Colinear Normal Fault Systems; What Can We Learn from 3D Seismic Reflection Data? *Journal of Structural Geology* 70, 141–155. <http://doi.org/10.1016/j.jsg.2014.11.007>.

Rønning J.S., Ganerød G.V., Dalsegg E., Reiser F., 2014. Resistivity Mapping as a Tool for Identification and Characterization of Weakness Zones in Crystalline Bedrock: Definition and Testing of an Interpretational Model. *Bulletin of Engineering Geology and the Environment* 73, 1225–1244. <https://doi.org/10.1007/s10064-013-0555-7>.

Ryazanov G.V., 1973. Morphology and Genesis of the Nepsky Fold. Nauka, Novosibirsk, 88 p. (in Russian) [Рязанов Г.В. Морфология и генезис складок Непской зоны. Новосибирск: Наука, 1973. 88 с.].

Rybalchenko V.V., Trusov A.I., Buddo I.V., Abramovich A.V., Smirnov A.S., Misurkeeva N.V., Shelokhov I.A., Otsimik A.A. et al., 2020. Increasing the Reliability of Solutions for Oil and Gas Prospecting Problems Based on the Integration of Seismic and Electrical Prospecting at the Sites of PJSC Gazprom (West and East Siberia). *Gas Industry* 10/807, 20–29 (in Russian) [Рыбальченко В.В., Трусов А.И., Буддо И.В., Абрамович А.В., Смирнов А.С., Мисюркеева Н.В., Шелохов И.А., Оцимик А.А. и др. Повышение достоверности решения нефтегазопроисковых задач по результатам комплексирования сейсмо- и электроразведки на участках ПАО «Газпром» (Западная и Восточная Сибирь) // Газовая промышленность. 2020. № 10/807. С. 20–29].

Sadovsky M.A., Bolkhovitinov L.G., Pisarenko V.F., 1987. Deformation of Geophysical Environment and Seismic Process. Nauka, Moscow, 100 p. (in Russian) [Садовский М.А., Болховитинов Л.Г., Писаренко В.Ф. Деформирование геофизической среды и сейсмический процесс. М.: Наука, 1987. 100 с.].

Sankov V.A., Miroshnichenko A.I., Levi K.G., Lukhnev A.V., Melnikov A.I., Delvaux D., 1997. Cenozoic Stress Field Evolution in the Baikal Rift Zone. *Bulletin du Centre de Recherches Elf Exploration Production* 21 (2), 435–455.

Sankov V.A., Parfeevets A.V., Miroshnichenko A.I., Byzov L.M., Lebedeva M.A., Sankov A.V., Dobrynina A.A., Kovalenko S.N., 2017. Late Cenozoic Faulting and the Stress State in the South-Eastern Segment of the Siberian Platform. *Geodynamics & Tectonophysics* 8 (1), 81–105 (in Russian) [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]. <https://doi.org/10.5800/GT-2017-8-1-0233>.

Schery S.D., Geaddert D.H., Wilkening M.H., 1982. Transport of Radon from Fractured Rocks. *Journal of Geophysical Research: Solid Earth* 87 (B4), 2969–2976. <https://doi.org/10.1029/JB087iB04p02969>.

Seminsky K.Zh., 1990. General Regularities of Dynamics of Structure Formation in Large Shear Zones. *Russian Geology and Geophysics* 4, 14–23 (in Russian) [Семинский К.Ж. Общие закономерности динамики структурообразования в крупных сдвиговых зонах // Геология и геофизика. 1990. № 4. С. 14–23].

Seminsky K.Zh., 2003. Internal Structure of Continental Fault Zones. Tectonophysical Aspect. GEO, Novosibirsk, 244 p. (in Russian) [Семинский К.Ж. Внутренняя структура континентальных разломных зон. Тектонофизический аспект. Новосибирск: Гео, 2003. 244 с.].

Seminsky K.Zh., 2008. Hierarchy in the Zone-Block Lithospheric Structure of Central and Eastern Asia. *Russian Geology and Geophysics* 49 (10), 771–779. <https://doi.org/10.1016/j.rgg.2007.11.017>.

Seminsky K.Zh., 2009. Major Factors of the Evolution of Basins and Faults in the Baikal Rift Zone: Tectonophysical Analysis. *Geotectonics* 43, 486–500. <https://doi.org/10.1134/S001685210906003X>.

Seminsky K.Zh., 2014. Specialized Mapping of Crustal Fault Zones. Part 1: Basic Theoretical Concepts and Principles. *Geodynamics & Tectonophysics* 5 (2), 445–467 (in Russian) [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>.

Seminsky K.Zh., 2015. Specialized Mapping of Crustal Fault Zones. Part 2: Main Stages and Prospects. *Geodynamics & Tectonophysics* 6 (1), 1–43 (in Russian) [Семинский К.Ж. Спецкартирование разломных зон земной коры. Статья 2: Основные этапы и перспективы // Геодинамика и тектонофизика. 2015. Т. 6. № 1. С. 1–43]. <https://doi.org/10.5800/GT-2015-6-1-0170>.

Seminsky K.Zh., Bobrov A.A., 2009. Radon Activity of Faults (Western Baikal and Southern Angara Areas). *Russian Geology and Geophysics* 50 (8), 674–684. <https://doi.org/10.1016/j.rgg.2008.12.010>.

Seminsky K.Zh., Bobrov A.A., 2018. Geoelectrical Images of Normal Fault Zones: Tectonophysical Interpretation of the Shallow-Depth Electrical Resistivity Tomography Data on the Buguldeika-Chernorud Graben in the Western Baikal Region. *Geodynamics & Tectonophysics* 9 (4), 1339–1361 (in Russian) [Семинский К.Ж., Бобров А.А. Геоэлектрический имидж

сбросовых зон: тектонофизическая интерпретация малоглубинной электротомографии на примере Бугульдейско-Чернорудского грабена в Западном Прибайкалье // Геодинамика и тектонофизика. 2018. Т. 9. № 4. С. 1339–1361]. <https://doi.org/10.5800/GT-2018-9-4-0399>.

Seminsky K.Z., Buddo I.V., Bobrov A.A., Misyurkeeva N.V., Burzunova Yu.P., Smirnov A.S., Shelokhov I.A., 2019. Mapping the Internal Structures of Fault Zones of the Sedimentary Cover: A Tectonophysical Approach Applied to Interpret TDEM Data (Kovykta Gas Condensate Field). *Geodynamics & Tectonophysics* 10 (4), 879–897 (in Russian) [Семинский К.Ж., Буддо И.В., Бобров А.А., Мисюркеева Н.В., Бурзунова Ю.П., Смирнов А.С., Шелохов И.А. Картирование внутренней структуры разломных зон осадочного чехла: применение тектонофизического подхода к интерпретации данных электроразведки методом 3D ЗСБ (на примере Ковыктинского газоконденсатного месторождения) // Геодинамика и тектонофизика. 2019. Т. 10. №4. С. 879–897]. <https://doi.org/10.5800/GT-2019-10-4-0447>.

Seminsky K.Zh., Demberel S., 2013. The First Estimations of Soil-Radon Activity near Faults in Central Mongolia. *Radiation Measurements* 49, 19–34. <https://doi.org/10.1016/j.radmeas.2012.12.013>.

Seminsky K.Zh., Sankov V.A., Ogibenin V.V., Burzunova Yu.P., Miroshnichenko A.I., Gorbunova E.A., Gorlov I.V., Smirnov A.S., Vakhromeev A.G., Buddo I.V., 2018. Tectonophysical Approach to the Analysis of Geological and Geophysical Data on Gas-Condensate Deposits with the Complex Platform Cover. *Geodynamics & Tectonophysics* 9 (3), 587–627 (in Russian) [Семинский К.Ж., Саньков В.А., Огибенин 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]. <https://doi.org/10.5800/GT-2018-9-3-0364>.

Seminsky K.Zh., Zaripov R.M., Olenchenko V.V., 2016. Interpretation of Shallow Electrical Resistivity Images of Faults: Tectonophysical Approach. *Russian Geology and Geophysics* 57 (9), 1349–1358. <https://doi.org/10.1016/j.rgg.2016.08.020>.

Sherman S.I., 1977. Physical Regularities of Crustal Faulting. Nauka, Novosibirsk, 102 p. (in Russian) [Шерман С.И. Физические закономерности развития разломов земной коры. Новосибирск: Наука, 1977. 102 с.].

Sherman S.I., Bornyakov S.A., Buddo V.Yu., 1983. Areas of Dynamic Influence of Faults (Modelling Results). Nauka, Novosibirsk, 112 p. (in Russian) [Шерман С.И., Борняков С.А., Буддо В.Ю. Области динамического влияния разломов (результаты моделирования). Новосибирск: Наука, 1983. 112 с.].

Sherman S.I., Seminsky K.Zh., Bornyakov S.A., Adamovich A.N., Buddo V.Yu., 1994. Faulting in the Lithosphere. Compressional Zones. Nauka, Novosibirsk, 263 p. (in Russian) [Шерман С.И., Семинский К.Ж., Борняков С.А., Адамович А.Н., Буддо В.Ю. Разломообразование в литосфере: Зоны сжатия. Новосибирск: Наука, 1994. 263 с.].

Sherman S.I., Seminsky K.Zh., Bornyakov S.A., Adamovich A.N., Lobatskaya R.M., Lysak S.V., Levi K.G., 1992. Faulting in the Lithosphere. Extension Zones. Nauka, Novosibirsk, 227 p. (in Russian) [Шерман С.И., Семинский К.Ж., Борняков С.А., Адамович А.Н., Лобацкая Р.М., Лысак С.В., Леви К.Г. Разломообразование в литосфере: Зоны растяжения. Новосибирск: Наука, 1992. 227 с.].

Sherman S.I., Seminsky K.Zh., Bornyakov S.A., Buddo V.Yu., Lobatskaya R.M., Adamovich A.N., Truskov V.A., Babichev A.A., 1991. Faulting in the Lithosphere. Strike-Slip Zones. Vol. 1. Nauka, Novosibirsk, 261 p. (in Russian) [Шерман С.И., Семинский К.Ж., Борняков С.А., Буддо В.Ю., Лобацкая Р.М., Адамович А.Н., Трусков В.А., Бабичев А.А. Разломообразование в литосфере. Зоны сдвига. Новосибирск: Наука, 1991. Т. 1. 261 с.].

Shuleikin V.N., 2018. Quantitative Study of Relationships of Hydrogen, Methane, Radon, and the Atmospheric Electric Field. *Izvestiya, Atmospheric and Oceanic Physics* 54, 794–804. <https://doi.org/10.1134/S0001433818080121>.

Silva S.C., Marcolino C.S., Lima F.D., 2005. Automatic Fault Extraction Using Ant Tracking Algorithm in the Marlim South Field, Campos Basin. In: Expanded Abstracts of the 2005 SEG Annual Meeting (November 6–11, 2005, Houston, USA). SEG, p. 857–861. <https://doi.org/10.1190/1.2148294>.

Sim L.A., 2013. Overview of the State of Knowledge on Paleotectonic Stresses and Their Implications for Solution of Geological Problems. *Geodynamics & Tectonophysics* 4 (3), 341–361 (in Russian) [Сим Л.А. Краткий обзор состояния изученности палеотектонических напряжений и их значение для решения геологических задач. Геодинамика и тектонофизика. 2013. Т. 4. № 3. С. 341–361]. <https://doi.org/10.5800/GT-2013-4-3-0105>.

Sizykh V.I., 2001. Thrust Tectonics of the Outskirts of Ancient Platforms. GEO, Novosibirsk, 154 p. (in Russian) [Сизых В.И. Шарьяжно-надвиговая тектоника окраин древних платформ. Новосибирск: Гео, 2001. 154 с.].

Smirnov A.S., Gorlov I.V., Yaickiy N.N., Gorskiy O.M., Ignatiev S.F., Pospeev A.V., Vakhromeev A.G., Agafonov Iu.A., Buddo I.V., 2016. Integration of Geological and Geophysical Data Is a Way to Design an Accurate Model of the Kovykta Gas Condensate Deposit. *Oil and Gas Geology* 2, 56–66 (in Russian) [Смирнов А.С., Горлов И.В., Яицкий Н.Н., Горский О.М., Игнатъев С.Ф., Поспеев А.В., Вахромеев А.Г., Агафонов Ю.А., Буддо И.В. Интеграция геолого-геофизических данных – путь к созданию достоверной модели Ковыктинского газоконденсатного месторождения // Геология нефти и газа. 2016. № 2. С. 56–66].

Sylvester A.G. (Ed.), 1984. Wrench Fault Tectonics. Tulsa, Oklahoma USA, 313 p.

Ufimtsev G.F., Schetnikov A.A., Myaktova V.V., Filinov I.A., 2005. Geomorphology and Neotectonics of Lena-Angara Plateau. *Geomorphology* 2, 97–106 (in Russian) [Уфимцев Г.Ф., Щетников А.А., Мяктова В.В., Филинов И.А. Геоморфология и морфотектоника Лено-Ангарского плато // Геоморфология. 2005. № 2. С. 97–106]. <https://doi.org/10.15356/0435-4281-2005-2-97-106>.

Utkin V.I., Mamurov E., Kan M.V., Krivasheev S.V., Yurkov A.K., Kosyakin I.I., Shishkanov A.N., 2006. Radon Monitoring in

the Northern Tien Shan with Application to the Process of Tectonic Earthquake Nucleation. *Izvestiya, Physics of the Solid Earth* 42, 775–784. <https://doi.org/10.1134/S1069351306090072>.

Vakhromeev A.G., Sverkunov S.A., Ilyin A.I., Pospeev A.V., Gorlov I.V., 2016. Mining and Geological Conditions of Drilling Brine Productive Zones with Abnormally High Reservoir Pressure in Natural Cambrian Reservoirs of the Kovykta Gas Condensate Field. *Proceedings of the Siberian Department of the Section of Earth Sciences Russian Academy of Natural Sciences. Geology Prospecting and Exploration of Ore Deposits* 55 (2), 74–87 (in Russian) [Вахромеев А.Г., Сверкунов С.А., Ильин А.И., Поспеев А.В., Горлов И.В. Горно-геологические условия бурения рапопроявляющих зон с аномально высоким пластовым давлением в природных резервуарах кембрия на Ковыктинском газоконденсатном месторождении // Известия Сибирского отделения Секции наук о Земле Российской академии естественных наук. Геология, поиски и разведка рудных месторождений. 2016. Т. 55. № 2. С. 74–87]. DOI:10.21285/0301-108X-2016-55-2-74-87.

Volpin S.G., Afanaskin I.V., Yudin V.A., Efimova N.P., 2018. The Possibility of Determining the Filtering Parameters of Disjunctive Disturbances of Oil Fields According to Hydrodynamical Studies of Wells and Reservoirs. *Moscow*, 262 p. (in Russian) [Вольпин С.Г., Афанаскин И.В., Юдин В.А., Ефимова Н.П. Возможность определения фильтрационных параметров дизъюнктивных нарушений на нефтяных месторождениях по данным гидродинамических исследований пластов и скважин. М., 2018. 262 с.].

Wilcox R.E., Harding T.P., Seely D.R., 1973. Basic Wrench Tectonics. *American Association of Petroleum Geologists Bulletin* 57 (1), 74–96.

Zamaraev S.M., Adamenko O.M., Ryazanov G.V., Kulchitskiy A.A., Adamenko R.S., Vikentyev N.M., 1976. Structure and

History of Development of the Predbaikalsky Submontane Trough. *Nauka, Moscow*, 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.].

Zolotarev A.G., 1967. New Data on Neotectonics and Neotectonic Activity of Morphostructures in the Southeastern Central Siberian Plateau and Baikal Mountains. In: *Tectonic Movements and Most Recent Structures of the Earth's Crust. Proceedings on Neotectonic Problems. Nedra, Moscow*, p. 399–393 (in Russian) [Золотарев А.Г. Новые данные о неотектонике и ее выражении в морфоструктурах юго-восточной части Средне-Сибирского плоскогорья и Байкальской горной области // Тектонические движения и новейшие структуры земной коры: Материалы совещания по проблемам неотектоники. М.: Недра, 1967. С. 399–393].

Zolotarev A.G., Khrenov P.M. (Eds), 1981. Neotectonic Map of the Southern East Siberia. Scale 1:1500000. *Aerogeologiya, Irkutsk* (in Russian) [Карта новейшей тектоники юга Восточной Сибири. Масштаб 1:1500000 / Ред. А.Г. Золотарев, П.М. Хренов. Иркутск: Аэрогеология, 1981].

Zubkov M.Yu., 2019. Application of Experimental Tectonic Methods in Petroleum Geology on the Examples of Deposits in Western Siberia. *Geotectonics* 3, 383–398. <https://doi.org/10.1134/S0016852119030105>.

Zubkov M.Yu., Bondarenko P.M., 1999. The Secondary-Fracture Zone Prediction through Seismic Survey and Tectonic Modeling. *Oil and Gas Geology* 11–12, 31–40 (in Russian) [Зубков М.Ю., Бондаренко П.М. Прогноз зон вторичной трещиноватости на основе данных сейсморазведки и тектонофизического моделирования // Геология нефти и газа. 1999. № 11–12. С. 31–40].