2023

№ 6

УДК 551.248.2

РЕКОНСТРУКЦИЯ ПАЛЕОНАПРЯЖЕНИЙ ЗАПАДНОГО САХАЛИНА ПО РЕЗУЛЬТАТАМ ТЕКТОНОФИЗИЧЕСКИХ ИССЛЕДОВАНИЙ

П. А. Каменев¹, А. В. Маринин²

¹Институт морской геологии и геофизики ДВО РАН, E-mail: p.kamenev@imgg.ru, ул. Науки, 16, 693022, г. Южно-Сахалинск, Россия ²Институт физики Земли РАН им. О. Ю. Шмидта, ул. Большая Грузинская, 10, 123242, г. Москва, Россия

Рассматриваются тектонические напряжения Западно-Сахалинского террейна, полученные с использованием различных тектонофизических методов. Представлена реконструкция поля напряжений угольных месторождений Сахалина, проведенная с помощью графического метода определения ориентировки осей напряжений по трещинам и разрывным нарушениям (для 16 точек наблюдения). Дополнительные полевые тектонофизические исследования позволили оценить преимущественную ориентацию основных систем зеркал скольжения разной кинематики и на их основе реконструировать параметры локальных стресс-тензоров в 53 точках наблюдения. По типу напряженного состояния для Западно-Сахалинского террейна наиболее характерным является горизонтальное растяжение.

Тектонические напряжения, зеркала скольжения, трещиноватость, угольные месторождения Сахалина, Западно-Сахалинский террейн, геомеханика

DOI: 10.15372/FTPRPI20230605

Изучение напряженно-деформированного состояния геосреды особенно важно для прогноза опасных динамических и газодинамических явлений (горных ударов, выбросов угля и газа). Они имели место на сахалинских шахтах Бошняковского и Лопатинского месторождений. В настоящее время уголь на Сахалине добывается только открытым способом, и геологические условия могут становиться более опасными ввиду объемного нарушения естественного залегания пород. При строительстве скважин в этом районе бурение, очевидно, будет сопряжено со значительными проблемами стабильности стенок скважины и, как следствие, повышенной аварийностью.

В современных условиях геомеханика рассматривается не только как сугубо горнодобывающая дисциплина, она активно внедряется в нефтегазовую отрасль. Строительство скважин и их эксплуатация в большинстве случаев немыслимы без понимания механических процессов в массиве горных пород [1, 2]. Это связано не только с увеличением разработки месторожде-

Работа выполнена при финансовой поддержке госзадания Института морской геологии и геофизики ДВО РАН (FWWM-2021-0001) и Института физики Земли РАН им. О. Ю. Шмидта (FMWU-2022-0008).

ний со сложными геологическими условиями, но и с применением сложной и дорогостоящей аппаратуры, для обеспечения работы которой необходимо понимание геологических условий с целью минимизации их негативных последствий.

Основная проблема добывающей отрасли в том, что бо́льшая часть геомеханических работ передана в руки зарубежных сервисных компаний. В условиях санкций это может осложнять работу. Другая проблема — плохое взаимодействие крупных нефтегазодобывающих и горнодобывающих компаний с отраслевой, университетской и академической наукой. Наблюдается полное доминирование на рынке зарубежных сервисных компаний, активно инвестирующих средства в науку и технологии. Однако несколько десятилетий назад отечественные технологии и прикладная наука развивались на должном уровне.

Цель настоящей работы — попытка соединить производственный опыт геологогеофизических работ, проводимых в СССР в 70-х годах ХХ в., с новыми данными, полученными при полевых тектонофизических исследованиях Западного Сахалина за 2020-2022 гг.

РАЙОН ИССЛЕДОВАНИЯ

В геологическом плане территория Западного Сахалина изучена весьма хорошо на суше и на море благодаря обширному комплексу геолого-геофизических работ и бурению, связанных с активной разработкой угольных месторождений и перспективами нефтегазоносности [3]. В современных условиях угольная отрасль Сахалина становится одним из флагманов региональной экономики [4, 5]. Перспективы освоения шельфовых проектов Западного Сахалина — Сахалин-8 и Сахалин-9 [6, 7], опирающиеся на комплексные геологические, геофизические и геохимические данные [8–10], ставят задачи дальнейшего изучения этой части острова, в том числе по детализации геодинамической обстановки, выполненной разными методами [11–14]. Один из них — реконструкция напряжений с помощью тектонофизических исследований.

На территории Сахалина выделяется Западно-Сахалинский террейн (рис. 1), неразрывно связанный с одноименными складчатой системой и субмеридиональным разломом [11, 15-17]. Террейн простирается практически по всей территории острова Сахалин от залива Виахту до полуострова Крильон, с запада ограничен Западно-Сахалинским разломом, с востока — Центрально-Сахалинским и прослеживается в структурно-формационных и структурнофациальных границах [18]. Его современная структура сформирована в плейстоцене и продолжает формироваться в обстановке сжатия в направлении юго-запад — северо-восток [11, 13]. Террейн образован преимущественно терригенными и в меньшей мере вулканогенными породами мела и кайнозоя прибрежно-морского и континентального происхождения. Морские отложения террейна содержат мелководную фауну и характеризуются цикличностью, а также перерывами в осадконакоплении [11, 15, 16, 19]. По всему простиранию Западно-Сахалинского террейна с севера на юг прослеживается сходные литотипы терригенных и туфогеннотерригенных морских (реже с прослоями пресноводно-континентальных) отложений от мелового до раннепалеоценового возраста [20]. Угленосные континентальные отложения выклиниваются и сменяются морскими терригенными образованиями на широте мыса Ламанон. В южной части террейна отмечаются комплексы туфов среднего и кислого состава мощностью до 9000 м. В северной части под кайнозойскими отложениями располагается позднемеловойраннепалеогеновый вулканический пояс, наблюдаемый по геофизическим данным и подтвержденный глубоким бурением. Туфогенно-терригенные меловые толщи террейна смещены на восток по Центрально-Сахалинскому разлому и наблюдаются вдоль восточного побережья Сахалина под кайнозойскими отложениями [16].



Рис. 1. Карта района исследований — Западно-Сахалинский террейн

На рис. 1 на круговых диаграммах, отражающих равноугольную стереографическую проекцию на верхнюю полусферу, показано положение осей главных напряжений (σ₁ — растяжения; σ₂ — промежуточные главные; σ₃ — сжатия), реконструированных на основе метода катакластического анализа разрывных смещений. Цифры на диаграммах — номер точки наблюдения, основная система разломов Сахалина отображена жирными линиями.

МЕТОДЫ ИССЛЕДОВАНИЯ

Одна из серьезных и глобальных задач современных геологии и геофизики, а также их направлений (геотектоники, геодинамики, геомеханики, тектонофизики) — реконструкция полей напряжения в литосфере, причем в различных масштабах, от глобального до локального. За рубежом усилия науки и производства в этом направлении были объединены, в результате чего появился проект The World Stress Map [21]. Он активно используется для фундаментальных и прикладных целей, в его основе лежат данные сейсмологии, скважинных измерений, а также геологические индикаторы напряжений. На карте наблюдений наибольшая плотность данных отмечается на территории Северной Америки и Европы, где проект активно применяется. Территория же бывшего СССР является своеобразным белым пятном. В России попытки создания схожих проектов предпринимались в [22–24], но не были широко поддержаны академической и индустриальной наукой и не получили широкого распространения. В настоящее время эти проекты развиваются исключительно благодаря инициативе научных групп без существенной поддержки государства и промышленников.

Работа [23] основана на натурных измерениях в рудниках основных горнопромышленных районах бывшего СССР. В [24] представлена глобальная карта напряжений, построенная преимущественно на основе механизмов очагов землетрясений. Отметим, что сотрудники этой лаборатории активно развивают и региональные исследования [25]. Отдельно можно упомянуть оригинальную методику реконструкции напряжений в Кольской сверхглубокой скважине СГ-3 [26].

Исследования напряженно-деформированного состояния с применением инструментальных методов на рудниках Сахалина не проводились. Последние измерения выполнены коллективом ИГД СО РАН на Николаевском месторождении полиметаллических руд в Восточном Приморье [27]. Отмечалось превышение горизонтальных напряжений над вертикальным (уН). Главные напряжения в субгоризонтальной плоскости на вскрытых горизонтах рудника при его строительстве составили: в направлении СВ-ЮЗ — 2.5уН; в направлении СЗ-ЮВ — 1.5уН. При этом направление регионального сжатия доверхнемеловых отложений Восточного Приморья и Дальнегорского района, в частности, установленное по результатам реконструкции палеонапряжений при анализе крупноамплитудных разрывных нарушений, ориентировано по азимуту C-C3 340°. Район месторождения характеризуется повышенной сейсмической активностью и высоким градиентом скорости новейших вертикальных движений. Отдельные попытки оценок поля напряжения в рамках локальных месторождений предпринимаются при построении геомеханических моделей на шельфовых проектах Сахалина [28, 29]. К сожалению, эти данные носят конфиденциальный характер и публикуются лишь их отдельные элементы и сведения. Тем не менее эти отрывочные сведения позволяют делать некоторые выводы о характере поля напряжения.

Аналогичные попытки построения карты распределения напряжений отдельных регионов и страны предпринимались в СССР [30]. Работы, представленные в [25], являются их логическим продолжением. В [30] с помощью сейсмологических данных и натурных измерений на рудниках и шахтах построена карта направлений действия главных напряжений в земной коре на территории СССР. Работы М. В. Гзовского значительно повлияли не только на академическую науку, но и на производственную деятельность, в частности на изучение тектонических напряжений шахтных полей Сахалина. Масштабные геолого-геофизические исследования выполнены в [31-33]. Теоретическую основу работ, описывающих угольные месторождения Западного Сахалина, составляет графический метод определения ориентировки осей напряжений по трещинам — метод сопряженных пар сколов с применением стереографических проекций [30]. Для реконструкции напряжений используются разрывы всех типов: от крупноамплитудных (>1000 м) до трещин (смещение <10 см). На тектонических схемах, составляемых по результатам геологоразведочных работ на угольных месторождениях, наиболее полно представленными оказываются средне- и крупноамплитудные смещения (>10 м), которые использовались в целях тектонофизического анализа. В качестве сопряженных принимались разнонаправленные левые и правые сбросо-сдвиги или сбросы, плоскости которых ориентированы навстречу друг другу.

На территории Западно-Сахалинского террейна в полевые сезоны 2020 – 2022 гг. изучались зеркала скольжения с определением относительных смещений на их бортах. Далее осуществлялась реконструкция напряженно-деформированного состояния методом катакластического анализа разрывных смещений [34, 35].

Метод структурно-парагенетического анализа малых дизъюнктивов (тектонической трещиноватости) базируется на представлении о квазипластическом деформировании массива горных пород, обеспечивающем энергетическую эффективность смещений по предварительно образованным нарушениям массива пород. Используются основные типы геологических индикаторов напряжений, которые характеризуют общий пространственно-временной ряд квазипластического деформирования выбранного участка горных пород. Малые дизъюнктивы (или тектоническая трещиноватость) образуют закономерные структурные рисунки, которые связаны между собой пространственно-временными характеристиками, позволяющими их объединить в парагенетические ассоциации или структурные парагенезисы (парагенезы). Полученные структурные диаграммы интерпретировались как для отдельных точек наблюдения, так и суммарно в соответствии с их принадлежностью к той или иной тектонической структуре региона.

При обработке замеров зеркал скольжения с установленной кинематикой смещений использовался метод катакластического анализа разрывных смещений [34, 36] и разработанная на его основе компьютерная программа STRESSgeol [35, 36]. Метод позволяет определить количественные характеристики реконструируемых локальных стресс-состояний. Это прежде всего положение осей главных напряжений, тип напряженного состояния, коэффициент Лоде – Надаи [36], а также значения напряжений. Метод основан на представлениях о квазипластическом деформировании геологической среды и положениях современной теории пластичности при максимуме диссипации внутренней упругой энергии для искомого тензора напряжений. Программа STRESSgeol содержит в своей основе автоматизированный итерационный алгоритм разделения сколов на однородные выборки, которые определяют временные фазы квазиоднородного деформирования макрообъема при достижении максимума суммарной энергии диссипации с минимальным количеством выделяемых фаз.

РЕЗУЛЬТАТЫ И ИХ ОБСУЖДЕНИЕ

Разрывные нарушения угольных месторождений западного побережья о. Сахалин на стереографических проекциях образуют два, реже три-четыре максимума. Для большинства исследованных месторождений характерны разрывы сбросового типа, поэтому разрывы, элементы залегания которых образуют каждую пару максимумов, могут рассматриваться как сопряженные. Каждый максимум элементов залегания разрывов изображается плоскостью на стереографической сетке, определяется линия пересечения сопряженных плоскостей σ_2 и биссектрисы острого σ_3 и тупого σ_1 углов. Параметры палеонапряженного состояния Западно-Сахалинского террейна на основе данных о разрывных нарушениях угольных месторождений [31–33] приведены в таблице.

| Месторож- дение | Шахта / крыло | Системы разрывов | | | | | | Оси главных напряжений | | | | | |
|--------------------|---------------------------------|------------------|-----------|-----|-----------|-----|-----------|------------------------|-----------|---------------|-----------|---------------|-----------|
| | | Ι | | II | | III | | $\sigma_{_1}$ | | $\sigma_{_2}$ | | $\sigma_{_3}$ | |
| | | а | φ | а | φ | а | φ | а | φ | а | φ | а | φ |
| Дуйское | — | 180 | 70 | 30 | 65 | | _ | 195 | 5 | 100 | 30 | 295 | 60 |
| Лопатинское | Долинская | 20 | 60 | 230 | 65 | | | 215 | 5 | 315 | 65 | 120 | 30 |
| Мгачинское | Западное | 70 | 70 | 175 | 70 | | _ | 215 | 5 | 125 | 60 | 305 | 30 |
| | Восточное | 210 | 70 | 330 | 75 | | _ | 0 | 5 | 270 | 60 | 90 | 35 |
| Бошняковское | Западное | 100 | 80 | 20 | 70 | | _ | 240 | 20 | 45 | 70 | 150 | 10 |
| | Восточное | 340 | 80 | 215 | 75 | | | 5 | 5 | 275 | 60 | 100 | 25 |
| | Южная центриклиналь | 110 | 80 | 250 | 85 | — | — | 270 | 5 | 175 | 70 | 5 | 20 |
| | Северная центриклиналь | 15 | 70 | 200 | 60 | _ | | 25 | 10 | 290 | 5 | 150 | 80 |
| Лесогорское | Тельновская | 150 | 65 | 340 | 80 | | _ | 335 | 10 | 65 | 20 | 225 | 70 |
| | Верхне-Тельновский участок 1 | 345 | 80 | _ | _ | 230 | 75 | 20 | 5 | 280 | 65 | 110 | 25 |
| | Верхне-Тельновский участок 2 | _ | _ | 40 | 75 | 230 | 75 | 225 | 5 | 315 | 15 | 130 | 70 |
| Углегорское | Сергеевский участок | 30 | 55 | 340 | 60 | | _ | 185 | 35 | 15 | 55 | 280 | 5 |
| | Углегорская 6 | 175 | 50 | 295 | 55 | | — | 150 | 5 | 240 | 40 | 50 | 55 |
| | Углегорская 4-1 | 290 | 65 | 180 | 40 | | — | 320 | 20 | 220 | 30 | 75 | 50 |
| | Углегорская 4-2 | | | | | 0 | 45 | 220 | 50 | 40 | 40 | 130 | 0 |
| | Ударновская | 0 | 35 | 90 | 55 | | | 240 | 50 | 25 | 30 | 125 | 20 |

Параметры палеонапряженного состояния Западно-Сахалинского террейна

Примечание. Углы падения пластов: Дуйское — 20–30°; Долинская — 20–25°; Мгачинское — 30°; Бошня-ковское – Южная центриклиналь / Северная центриклиналь — 50–55/15–20°; Тельновская — 10–25°; Углегорское — 10–35°; *а* — азимут падения; φ — угол падения.

Размещение осей главных нормальных напряжений, приведших к формированию современных структур угольных месторождений западного побережья о. Сахалин, даны на рис. 2. Общая для всех месторождений закономерность — практически горизонтальное положение оси растяжения σ_1 , ориентированной субмеридионально. Северная и северо-северо-восточная ориентировка оси σ_1 , характерная для Мгачинского, Дуйского, Лесогорокого, Лопатинского, а также большей части Бошняковского и Углегорского месторождений резко меняется на субширотное на юге Бошняковского и Углегорского месторождений. Ось сжатия σ_3 ориентирована в общем субширотно с незначительными отклонениями в северном и южном направлениях и наклонена под углами $30-70^\circ$.



Шахта, крыло / Месторождение

- 1 Дуйское месторождение
- 2 Восточное / Мгачинское
- 3 Западное / Мгачинское
- 4 Западное / Бошняковское
- 5 Восточное / Бошняковское
- 6 Южная центриклиналь / Бошняковское
- 7 Северная центриклиналь / Бошняковское
- 8 Тельновская / Лесогорское
- 9 Верхне-Тельновский 1 / Лесогорское
- 10 Верхне-Тельновский 2 / Лесогорское
- 11 Сергеевский участок / Углегорское
- 12 Ударновская / Углегорское
- 13 Углегорская 6 / Углегорское
- 14 Углегорская 4-1 / Углегорское
- 15 Углегорская 4-2 / Углегорское
- 16 Долинская / Лопатинское

Рис. 2. Тектонические поля напряжений угольных месторождений Западного Сахалина, реконструированные на основе метода М. В. Гзовского [31–33]. Оси главных напряжений: σ₁ — растяжения; σ₂ — промежуточные; σ₃ — сжатия

Сопоставляя положение осей главных нормальных напряжений с основными структурными элементами западного побережья острова, можно заключить, что общее для всех месторождений субмеридиональное направление оси максимальных растягивающих напряжений совпадает с простиранием одного из определяющих структурных элементов острова Западно-Сахалинского разлома. Это позволяет предположить, что месторождения угля находятся в зоне растяжения разлома. Такое предположение отвечает теоретическим представлениям о распределении напряжений вблизи разломов [30], что определяет развитие преимущественно сбросовых форм в структуре месторождений западного побережья острова. Локальные изменения направления оси растягивающих напряжений могут быть объяснены развитием тектонических структур более низкого порядка — формированием антиклинального поднятия в южной части Бошняковского месторождения и скрытого разлома глубокого заложения, расположенного южнее Углегорского месторождения. Характерное северо-восточное простирание оси растяжения в южной части Углегорского месторождения (поле шахты "Ударновская") на некотором отдалении (поле шахты № 6) сменяется на обычное субмеридиональное.

На поле шахты № 4, расположенной между названными, системы существующих разрывов, образующие на диаграмме четыре максимума, могут быть объяснены сочетанием двух полей напряжений. В одном из них ось растяжения совпадает с простиранием Западно-Сахалинского разлома, а в другом — с простиранием оперяющего разлома. Наложение этих двух полей напряжений привело к формированию наиболее сложной в пределах месторождения структуры участка. Предполагается, что источником сжимающих напряжений, повсеместно ориентированных в субширотном направлении — общим для всех месторождений, явилась растущая присводовая часть Западно-Сахалинского антиклинория [31–33].

Субмеридиональное (оси растяжения σ_1) и субширотное (оси сжатия σ_3) положения позволяют рассматривать разрывы сбросового типа как трещины отрыва, возникшие в субширотном, т. е. перпендикулярном к оси растяжения направлении. Разрывы сдвигового характера образовались под углами менее 45° относительно направления действия максимальных сжимающих напряжений. При таком объяснении причин возникновения разрывов для северо-западного простирания должно быть характерно смещение висячих крыльев влево (правые сдвиги), а северо-восточного — направо (левые сдвиги). Эта закономерность отчетливо выражена и за исключением единичных разрывов наблюдается на всех исследованных месторождениях [31–33].

Общее для всех месторождений тектоническое поле напряжений сформировано двумя активно развивавшимися в антропогене структурами — Западно-Сахалинским антиклинорием и Западно-Сахалинским разломом глубокого заложения [20, 37]. В результате наложения полей обеих структур более значительными оказались растягивающие напряжения, что обусловило преимущественное развитие в пределах западного побережья сбросовых форм дислокаций.

Полевые тектонофизические исследования позволили собрать необходимые данные в 53 точках наблюдения в пределах Западно-Сахалинского террейна (см. рис. 1). На основе полевых замеров зеркал скольжений проведена реконструкция с использованием метода катакластического анализа разрывных нарушений. Полученные результаты реконструкции ориентации осей главных напряжений с использованием графического метода определения ориентировки осей напряжений по трещинам из [31–33] и метода катакластического анализа разрывных замеров зеркал скольжений представлены на рис. 3. На круговых диаграммах (равноугольная стереографическая проекция верхней полусферы) показаны выходы осей главных напряжений: σ_1 — растяжения; σ_2 — промежуточная; σ_3 — сжатия.



Рис. 3. Ориентация осей главных напряжений Западного Сахалина с использованием графического метода определения ориентировки осей напряжений по трещинам (*a*) и метода катакластического анализа разрывных замеров зеркал скольжений (б): 1 — минимальное сжатие (растяжение); 2 — промежуточное; 3 — максимальное сжатие

По типу напряженного состояния, реконструированного для территории Западно-Сахалинского террейна, наиболее характерным является горизонтальное растяжение. Это более половины всех точек наблюдения — 54 % (29 точек). Следующий по частоте тип (горизонтальный сдвиг) — 21 % (11 точек) от общего числа. Горизонтальным растяжением со сдвигом характеризуются 15 % (8 точек). Более редкие типы напряженного состояния Западно-Сахалинского террейна — горизонтальное сжатие — 8 % (4 точки) и сдвиг в вертикальной / горизонтальной плоскости — 2 % (1 точка). Анализ коэффициента Лоде – Надаи дает схожие результаты. Такое распределение существенно отличается от наблюдений на других территориях о. Сахалин [38, 39].

Несмотря на существенную разницу в объектах исследования (географический охват, плотность данных, временной промежуток, методика), можно наблюдать удовлетворительное сходство в ориентировке осей главных напряжений, полученных разными авторскими коллективами. Общая черта обоих исследований — субмеридиональное положение оси растяжения σ_1 , которое более ярко выражено при использовании методики графического метода определения ориентировки осей напряжений по трещинам. Это объясняется, во-первых, меньшим количеством исходных точек — 16 против 53, что справедливо и для остальных двух осей. Большая плотность точек по зеркалам скольжения дает более сложное итоговое распределение. Во-вторых, метод реконструкции изначально нацелен на выборку преимущественной системы трещин, а метод по зеркалам скольжения регистрирует абсолютно все многообразие систем борозд и зеркал скольжения.

Породы Западно-Сахалинского террейна преимущественно терригенные с невысокой прочностью, что создает предпосылки к сбросовым подвижкам, находя отражение как в первичном материале исследования (замерам зеркал скольжений), так и при последующей реконструкции тектонических напряжений. Такое характерное поведение горных пород под воздей-

ствием гравитационной компоненты объясняет некоторое отличие результатов, полученных на основе зеркал скольжений, от других методов реконструкции тектонических напряжений, например с помощью механизмов очагов землетрясений.

выводы

Типы напряженного состояния для всего региона исследования следующие: горизонтальное растяжение 54%; горизонтальное растяжение в сочетании со сдвигом 15%; горизонтальный сдвиг 21%; горизонтальное сжатие 8%; сдвиг в вертикальной/горизонтальной плоскости 2%.

Ось максимального сжатия σ_3 , полученная по методике М. В. Гзовского по сколовым трещинам, характеризуется субширотной ориентировкой с некоторыми вариациями. Методом катакластического анализа разрывных смещений по зеркалам скольжения определена субширотная ориентировка, однако ось максимального сжатия ориентирована более субвертикально. Причина этого в большом количестве наблюдаемых зеркал скольжения, имеющих сбросовый характер.

Изучение напряженно-деформированного состояния активных континентальных окраин имеет важное значение в плане получения информации о ранних этапах формирования современных внутриконтинентальных орогенов. При реконструкции палеонапряжений исследования сталкиваются с трудностями расшифровки деформационных событий на ранних стадиях формирования складчатых поясов, представлявших активные окраины древних континентов с системами вулканических дуг и задуговых бассейнов.

Авторы признательны младшему научному сотруднику ИМГиГ ДВО РАН В. А. Дегтяреву за помощь в работе с архивными материалами и инженеру О. А. Жердевой за помощь в работе с графикой, а также научному сотруднику ИФЗ РАН А. Р. Лукманову за помощь в полевых и камеральных работах.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

- 1. Zoback M. D. Reservoir Geomechanics, Cambridge: Cambridge University Press, 2007. 505 p.
- 2. Dubinya N., Tikhotsky S., Bayuk I., Beloborodov D., Krasnova M., Makarova A., Rusina O., and Fokin I. Prediction of physical-mechanical properties and in-situ stress state of hydrocarbon reservoirs from experimental data and theoretical modeling, SPE Russian Petroleum Technol. Conf., 2017.
- 3. Тронов Ю. А., Харахинов В. В., Кононов В. Э., Пудиков Э. Г. Северо-Татарский нефтегазоносный бассейн // Тихоокеанская геология. — 1987. — № 6. — С. 45–49.
- 4. Солнцевский разрез флагман Дальневосточной угледобычи // Уголь. 2019. № 3. С. 36-39.
- 5. Недра Сахалинской области / ред.-сост. А. В. Тарасов. Южно-Сахалинск, 2013. 120 с.
- **6.** Новиков Ю. Н. Достижения и проблемы недропользования на шельфе Сахалина // Нефтегазовая геология. Теория и практика. 2008. № 3. С. 1–12.
- **7.** Ампилов Ю. П. Сахалинские нефтегазовые проекты вчера, сегодня, завтра. [Электронный ресурс]. URL: https://www.researchgate.net/publication/336147912.
- 8. Жаров А. Э., Кириллова Г. Л., Маргулис Л. С., Чуйко Л. С., Куделькин В. В., Варнавский В. Г., Гагаев В. Н. Геология, геодинамика и перспективы нефтегазоносности осадочных бассейнов Татарского пролива / Отв. ред. Г. Л. Кириллова. Владивосток: Дальнаука, 2004. 220 с.

- **9.** Нечаюк А. Е., Обжиров А. И. Структуры и нефтегазоносность бассейнов Татарского пролива // Вестн. КРАУНЦ. Науки о Земле. — 2010. — № 2 (16). — С. 27–34.
- 10. Сенин Б. В., Керимов В. Ю., Лавренова Е. А., Мустаев Р. Н. Геодинамический анализ и региональный прогноз нефтегазоносности Татарского пролива Японского моря на основе применения технологий численного моделирования // Тихоокеанская геология. — 2022. — Т. 41. — № 4. — С. 41–59.
- 11. Голозубов В. В., Касаткин С. А., Гранник В. М., Нечаюк А. Е. Деформации позднемеловых и кайнозойских комплексов Западно-Сахалинского террейна // Геотектоника. 2012. № 5. С. 22–43.
- 12. Голозубов В. В., Касаткин С. А., Малиновский А. И., Нечаюк А. Е., Гранник В. М. Дислокации меловых и кайнозойских комплексов Западно-Сахалинского террейна // Геотектоника. 2016. № 4. С. 105–120.
- 13. Сим Л. А., Богомолов Л. М., Брянцева Г. В., Саввичев П. А. Неотектоника и тектонические напряжения острова Сахалин // Геодинамика и тектонофизика. 2017. Т. 8. № 1. С. 181–202.
- **14.** Прытков А. С., Василенко Н. Ф. Деформации земной поверхности острова Сахалин по данным GPS-наблюдений // Геодинамика и тектонофизика. 2018. Т. 9. № 2. С. 503 514.
- **15.** Гранник В. М. Изверженные породы западно-сахалинского террейна острова Сахалин // ДАН. 2016. Т. 470. № 6. С. 688-691.
- **16. Объяснительная записка** к Тектонической карте Охотоморского региона масштаба 1:2500000 / Отв. ред. Н. А. Богданов, В. Е. Хаин. М.: ИЛОВМ, 2000. 193 с.
- **17. Жаров А. Э.** Аккреционные и коллизионные структуры Юго-Восточного Сахалина // ДАН. 2003. Т. 393. № 3. С. 366–370.
- 18. Гладенков Ю. Б., Баженова О. К., Гречин В. И., Маргулис Л. С., Сальников Б. А. Кайнозой Сахалина и его нефтегазоносность. М.: Геос, 2002. 225 с.
- **19. Харахинов В. В.** Нефтегазовая геология Сахалинского региона. М.: Научный мир, 2010. 275 с.
- 20. Рождественский В. С. Активный рифтинг в Японском и Охотском морях и тектоническая эволюция Центрально-Сахалинского разлома в кайнозое // Тихоокеанская геология. 2008. № 1. С. 17–28.
- Heidbach O., Rajabi M., Cui X., Fuchs K., Müller K., Reinecker B., Reiter J., Tingay K., Wenzel F., Xie F., Ziegler M., Zoback M. L., and Zoback M. D. The world stress map database release 2016: Crustal stress pattern across scales, Tectonophysics, 2018, Vol. 744. — P. 484–498.
- 22. Леонтьев А. В. Анализ естественных напряжений по результатам измерений в рудниках на территории северной Евразии // ФТПРПИ. 2001. № 1. С. 31–40.
- 23. Козырев А. А., Савченко С. Н. Закономерности распределения тектонических напряжений в верхней части земной коры // Физика Земли. 2009. № 11. С. 34–43.
- 24. Ахмедов М. Б., Шлюнкин А. В., Лукьянов И. В., Ребецкий Ю. Л. Поле современных напряжений земной коры на сайте ИФЗ РАН "Global Stress Map" // Современная тектонофизика. Методы и результаты: Материалы IV молодежной тектонофизической школы-семинара. — М.: ИФЗ РАН, 2015. — Т. 1. — С. 16–21.
- **25.** Российская тектонофизика. К 100-летнему юбилею Михаила Владимировича Гзовского: сб. статей / Отв. ред. Ю. А. Морозов. Апатиты: ФИЦ КНЦ РАН, 2019. 359 с.
- **26.** Савченко С. Н. Оценка напряженного состояния пород в районе бурения Кольской сверхглубокой скважины // ФТПРПИ. 2004. № 1. С. 27–34.

- **27.** Барышников В. Д., Курленя М. В., Леонтьев А. В. О напряженно-деформированном состоянии Николаевского месторождения // ФТПРПИ. — 1982. — № 2. — С. 3–12.
- **28.** Али А. Х., Марти Ш., Еса Р. Передовой метод гидравлического разрыва пласта с использованием геомеханического моделирования и механики пород технически интегрированный подход // Нефтегазовое обозрение. 2002. С. 75–83.
- **29.** Али А. Х., Браун Т., Дельгадо Р. Моделирование механических свойств геологической среды как средство расшифровки напряжений // Нефтегазовое обозрение. 2005. С. 4–23.
- **30.** Гзовский М. В. Основы тектонофизики. М.: Наука, 1975. 536 с.
- **31. Шпеталенко Л. П.** К прогнозированию мелкоамплитудных разрывов угольных месторождений Сахалина // Геология и минерально-сырьевые ресурсы Сахалина и Курильских островов. Южно-Сахалинск: Сахалинское отд-ние ДКИ, 1974. С. 51–53.
- **32.** Шпеталенко Л. П. О количественной характеристике тектонической нарушенности угольных месторождений Сахалина // Геология и перспективы нефтегазоносности, рудного и нерудного сырья Советского Дальнего Востока. Южно-Сахалинск: Сахалинское отд-ние ДКИ, 1973. С. 91–93.
- **33.** Шпеталенко Л. П., Чмыхалова Т. П., Чайникова М. В. Атлас тектонических структур угольных месторождений Сахалина. Южно-Сахалинск, 1976. 93 с.
- **34.** Ребецкий Ю. Л. Развитие метода катакластического анализа сколов для оценки величин тектонических напряжений // ДАН. 2003. Т. 3. № 2. С. 237–241.
- **35.** Ребецкий Ю. Л., Сим Л. А., Маринин А. В. От зеркал скольжения к тектоническим напряжениям. Методы и алгоритмы. — М.: Геос, 2017. — 234 с.
- **36.** Ребецкий Ю. Л. Тектонические напряжения и прочность горных массивов. М.: Академкнига, 2007. 406 с.
- **37. Харахинов В. В., Гальцев-Безюк С. Д., Терещенков А. А.** Разломы Сахалина // Тихоокеанская геология. 1984. № 2. С. 77 86.
- 38. Маринин А. В., Ребецкий Ю. Л., Сим Л. А., Каменев П. А., Костров Ю. В., Бондарь И. В., Гордеев Н. А., Дегтярев В. А. Реконструкция тектонических напряжений на полуострове Шмидта (Сахалин) // Вестн. КРАУНЦ. Науки о Земле. — 2021. — № 4. — Т. 52. — С. 73–88.
- **39.** Каменев П. А., Маринин А. В., Дегтярев В. А., Лукманов А. Р. Реконструкция тектонических напряжений Центрального Сахалина // Вестн. КРАУНЦ. Науки о Земле. 2023. № 1. С. 89–103.

Поступила в редакцию 13/IX 2023 После доработки 25/X 2023 Принята к публикации 16/XI 2023