

Изучение трещинных коллекторов при проведении геологоразведочных работ в северо-восточной части о. Сахалин

© 2021 Ю. В. Костров^{*1}, В. А. Дегтярев^{1,2}, А. В. Маринин³, Э. К. Хмарин¹, П. А. Каменев²

¹ООО «РН-СахалинНИПИморнефть», Южно-Сахалинск, Россия

²Институт морской геологии и геофизики ДВО РАН, Южно-Сахалинск, Россия

³Институт физики Земли РАН им. О.Ю. Шмидта, Москва, Россия

*E-mail: yvkostrov@snipi.rosneft.ru

Резюме. В рамках полевых экспедиций на северо-востоке о. Сахалин с целью изучения кремнистых отложений пильской свиты для разработки методики локализации залежей нефти в нетрадиционных трещинных коллекторах изучены естественные обнажения кайнозойских отложений на п-ове Шмидта и в Пограничном прогибе. Отобраны образцы для аналитических исследований (геомеханических, геохимических, литологических и т.п.), изучены малые структурные формы (складки, разрывные нарушения зеркала скольжения, отрывы, сколовые трещины), являющиеся индикаторами тектонических деформаций массива горных пород. Показано, что интенсивность трещиноватости сильно зависит от литологии, положения точки наблюдения относительно дизъюнктивных и/или пликативных структур. Направление трещин меняется в зависимости от положения относительно элементов локальных складок и от положения блока (при мелкоблочном строении). По результатам полевых наблюдений, зона интенсивных дислокаций имеет крайне незначительную мощность – как правило, первые десятки метров. Отмечена резкая неоднородность поля напряжения в окрестности Пограничного прогиба, отраженная в характере элементов залеганий, структурных нарушений и парагенезов. В северной части прогиба выделены многочисленные дебитующие нефтепроявления, связанные с открытой трещиноватостью, которая, очевидно, свидетельствует о продолжающемся до настоящего времени режиме растяжения.

Ключевые слова: нетрадиционные коллекторы, кремнистые отложения, тектонические напряжения, деформации, борозды скольжения, трещиноватость, геологоразведочные работы, остров Сахалин

Study of fractured reservoirs during geological exploration in the north-eastern part of the Sakhalin Island

Yurii V. Kostrov^{*1}, Vladislav A. Degtyarev^{1,2}, Anton V. Marinin³,

Eduard K. Khmarin¹, Pavel A. Kamenev²

¹LLC “RN-SakhalinNIPImorneft”, Yuzhno-Sakhalinsk, Russia

²Institute of Marine Geology and Geophysics, FEB RAS, Yuzhno-Sakhalinsk, Russia

³Schmidt Institute of Earth Physics, RAS, Moscow, Russia

*E-mail: yvkostrov@snipi.rosneft.ru

Abstract. During a geological fieldworks in the northeast of Sakhalin Island in order to study the siliceous deposits of the Pilskaya formation and to develop a technique for locating oil deposits in unconventional fractured reservoirs, natural outcrops of Cenozoic deposits on the Schmidt Peninsula and in the Pogranichny depression were studied. Samples were taken for analytical studies (geomechanical, geochemical, lithological, etc.), structural forms (folds, minor faults, slickensides, tension gashes, joints, shear fractures), which are indicators of tectonic deformations of the rock massive, were studied. It is shown that the intensity of fracturing strongly depends on the lithology, the position of the observation point relative to disjunctive and/or plicative structures. The direction of the joints varies depending on the position relative to the elements of the local folds and on the position of the block (with a small-block structure). According to the

results of field observations it is shown, that the zone of intense dislocations has an extremely insignificant thickness usually the first tens of meters. An extremely nonuniformity of the stress field in the vicinity of the Pogranichnyi depression is noted, which is reflected in the nature of the dipping planes, structural patterns and parageneses. In the northern part of the syncline, numerous flowing oil shows associated with open fracturing are identified, which obviously indicates the extension regime that continues up to this day.

Keywords: unconventional reservoirs, siliceous deposits, tectonic stress, deformations, slickensides, fracturing, geological fieldwork, Sakhalin Island

Для цитирования: Костров Ю.В., Дегтярев В.А., Маринин А.В., Хмарин Э.К., Каменев П.А. Изучение трещинных коллекторов при проведении геологоразведочных работ в северо-восточной части о. Сахалин. *Геосистемы переходных зон*, 2021, т. 5, № 2, с. 153–166. <https://doi.org/10.30730/gtr.2021.5.2.153-166>

For citation: Kostrov Yu.V., Degtyarev V.A., Marinin A.V., Khmarin E.K., Kamenev P.A. Study of fractured reservoirs during geological exploration in the north-eastern part of the Sakhalin Island. *Geosistemy perehodnykh zon = Geosystems of Transition Zones*, vol. 5, no. 2, pp. 153–166. (In Russ., abstr. in Engl.). <https://doi.org/10.30730/gtr.2021.5.2.153-166>

Благодарности

Выражаем благодарность сотрудникам центрального аппарата управления компании ПАО «НК «Роснефть» А.В. Мирошниченко, А.А. Пашали, К.В. Торопову, И.А. Середе, без участия которых данная работа была бы невозможна. А также сотрудникам лаборатории фундаментальных и прикладных проблем тектонофизики ИФЗ РАН – Н.А. Гордееву, И.В. Бондарю, Ю.Л. Ребецкому, Л.А. Сим, внесшим весомый вклад в проведение экспедиции, обработку и интерпретацию полученных данных.

Введение

В настоящее время в связи с исчерпанием фонда крупных месторождений нефти и газа с традиционным (поровым) типом коллектора все большее значение приобретают залежи с так называемым нетрадиционным коллектором. К таким коллекторам относят, в частности, трещинные коллекторы кремнистых пород с практически нулевой матричной проницаемостью, где определяющим фактором качества коллектора является его трещиноватость. Для эффективного прогноза распространения зон трещиноватости при проведении геологоразведочных работ и проектировании гидроразрыва пласта необходимо изучение закономерностей распределения напряжений и связанной с ними исходной трещиноватости района исследований [Gale et al., 2014; Wang, 2019]. На сегодняшний день не существует единой оптимальной методики такого прогноза. Тем не менее как отечественными, так и зарубежными специалистами предпринимаются попытки обобщения теоретической, лабораторной и полевой информации [Жиров, 2019; Опарин и др., 2015; Llanos et al., 2017].

В 2020 г. на п-ове Шмидта и в Пограничном прогибе о. Сахалин (рис. 1) проектным институтом компании Роснефть ООО «РН-СахалинНИПИморнефть» совместно с Институтом физики Земли им. О.Ю. Шмидта

Acknowledgements

We are grateful to the staff of central management office of the PJSC OC Rosneft A.V. Miroshnichenko, A.A. Pashali, K.V. Toropov, I.A. Sereda, without of whose participation this work would have been impossible. And, also, to the staff of the laboratory of fundamental and applied problems tectonophysics IPE RAS – N.A. Gordeev, I.V. Bondar, Yu.L. Rebetsky, L.A. Sim, who made a significant contribution to the fieldwork, processing and interpretation of the data obtained.

Российской академии наук (ИФЗ РАН) и Институтом морской геологии и геофизики Дальневосточного отделения Российской академии наук (ИМГиГ ДВО РАН) проведены полевые экспедиции с целью изучения кремнистых отложений пильской и пиленгской свит для разработки методики локализации залежей нефти в трещинных коллекторах [Каменев и др., 2021]. В задачи исследования входило: изучение естественных обнажений кайнозойских отложений и отбор образцов для аналитических исследований (геомеханических, геохимических, литологических), изучение малых структурных форм (складки, разрывные нарушения, зеркала скольжения, отрывы, сколовые трещины), являющихся индикаторами тектонических деформаций массива горных пород; затем построение диаграмм трещиноватости на основе методов структурной геологии и тектонофизики, реконструкция напряженно-деформированного состояния.

Общие первичные результаты экспедиции на п-ове Шмидта – характеристика и геологическое строение района исследований, методические принципы отбора проб для геомеханических, геохимических, литологических, а также тектонофизических исследований опубликованы в работе [Каменев и др., 2021]. В настоящей статье основное внимание уде-

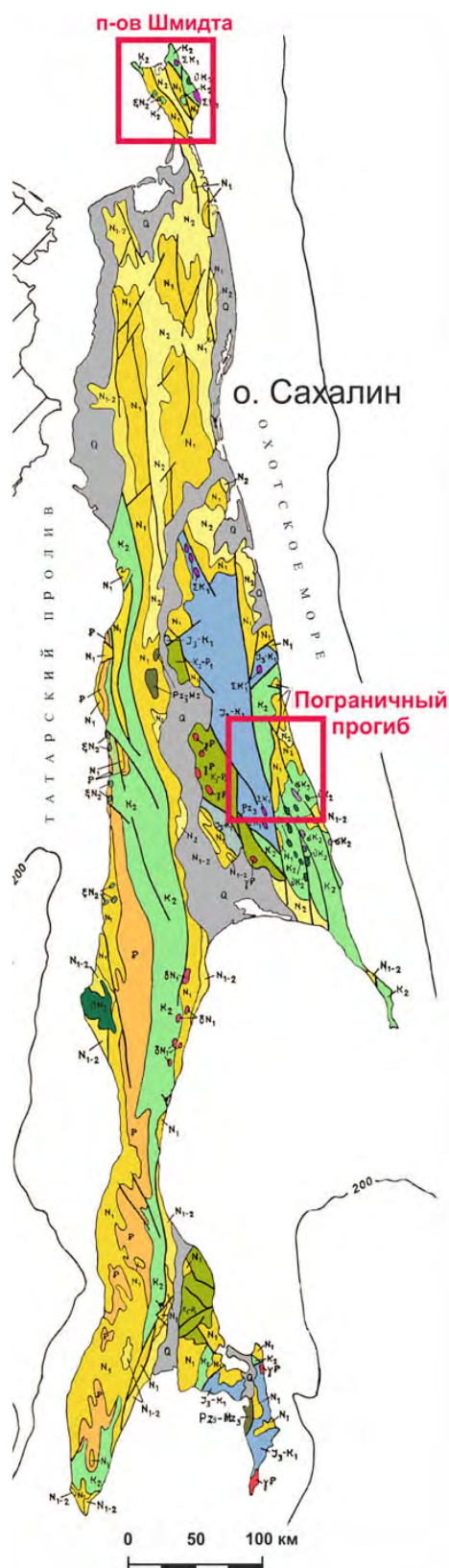


Рис. 1. Обзорная схема о. Сахалин с выделенными районами исследования (по: [Геология СССР, 1970]).

Figure 1. Overview scheme of Sakhalin Island with highlighted study areas according to [Geology of the USSR, 1970].

лено региональной геодинамике и структурной геологии п-ова Шмидта и Пограничного прогиба по результатам двух экспедиций.

Методики и результаты

Сахалин расположен в зоне сдвигового взаимодействия крупных литосферных плит – Амурской и Охотоморской. Между этими плитами с конца мезозоя и до настоящего времени развивается зона широкого сложного сдвига толщ и формируется система сближенных глубинных сдвигов [Сим и др., 2017]. Тектоническое строение континентальных окраин, к которым относится о. Сахалин, крайне сложное. Остров в упрощенном виде представляет собой горст, находящийся в зоне коллизии между Амурской и Тихоокеанской плитами (рис. 2). И в этом плане имеют

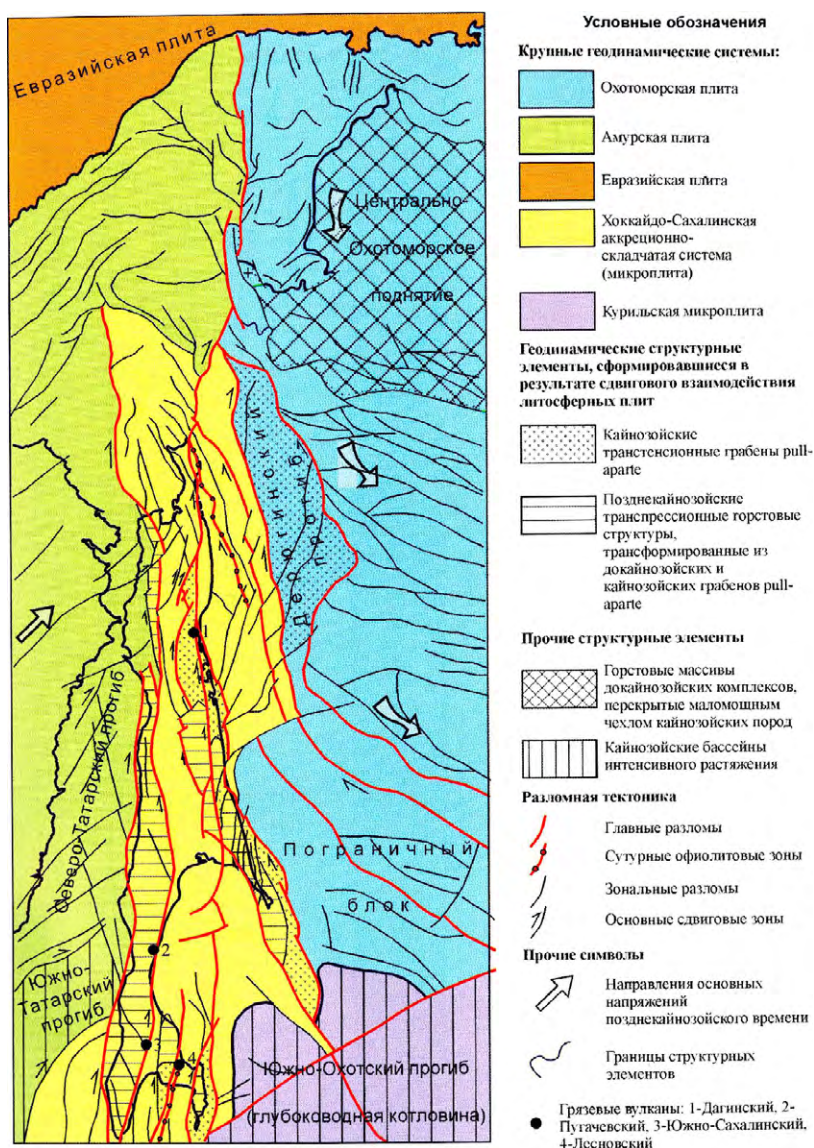


Рис. 2. Карта кайнозойской геодинамики западной части Охотоморья согласно [Харахинов, 2010].

Figure 2. Map of the Cenozoic geodynamics of the western part of the Sea of Okhotsk region according to [Kharakhinov, 2010].

значение некоторые особенности. Во-первых, периоды сжатия сменяются периодами растяжения. Во-вторых, так как взаимодействие вышеуказанных плит происходит не перпендикулярно, а под острым углом, характер деформаций горных пород крайне неравномерен и неоднороден [Polets, 2019; Heidbach et al.,

2018]. В-третьих – наиболее интенсивной является более молодая Сахалинская фаза тектонической активации.

Поверхность мезозойского фундамента Сахалина представлена породами различного возраста, генезиса и состава: верхнеюрскими яшмоидами, кремнисто-глинистыми сланцами, вулканогенно-кремнистыми, основными и ультраосновными изверженными породами; нижнемеловыми сильно литифицированными вулканогенно-осадочными породами; верхнемеловыми, преимущественно морскими аргиллитами и алевролитами [Экосистемы кайнозоя..., 1999].

Кайнозойский чехол имеет значительную мощность (более 10 км на шельфе) толщ вулканогенно-осадочных и осадочных пород морского и прибрежно-терригенного генезиса [Гладенков и др., 2002]. В районе п-ова Шмидта весь кайнозойский разрез представлен кремнистыми и кремнийсодержащими породами с уменьшением содержания кремнезема от олигоценовых перекристаллизованных опок тумской свиты (P_3tm) до диатомитов верхнемиоцен-плиоценовой маям-рафской свиты (N_{1-2mm}) и терригенных лигнитонных отложений верхнеплиоценовой помырской свиты (N_2pm) (рис. 3) [Коноваленко и др., 2009].

Для восточного побережья п-ова Шмидта главными разрывными структура-

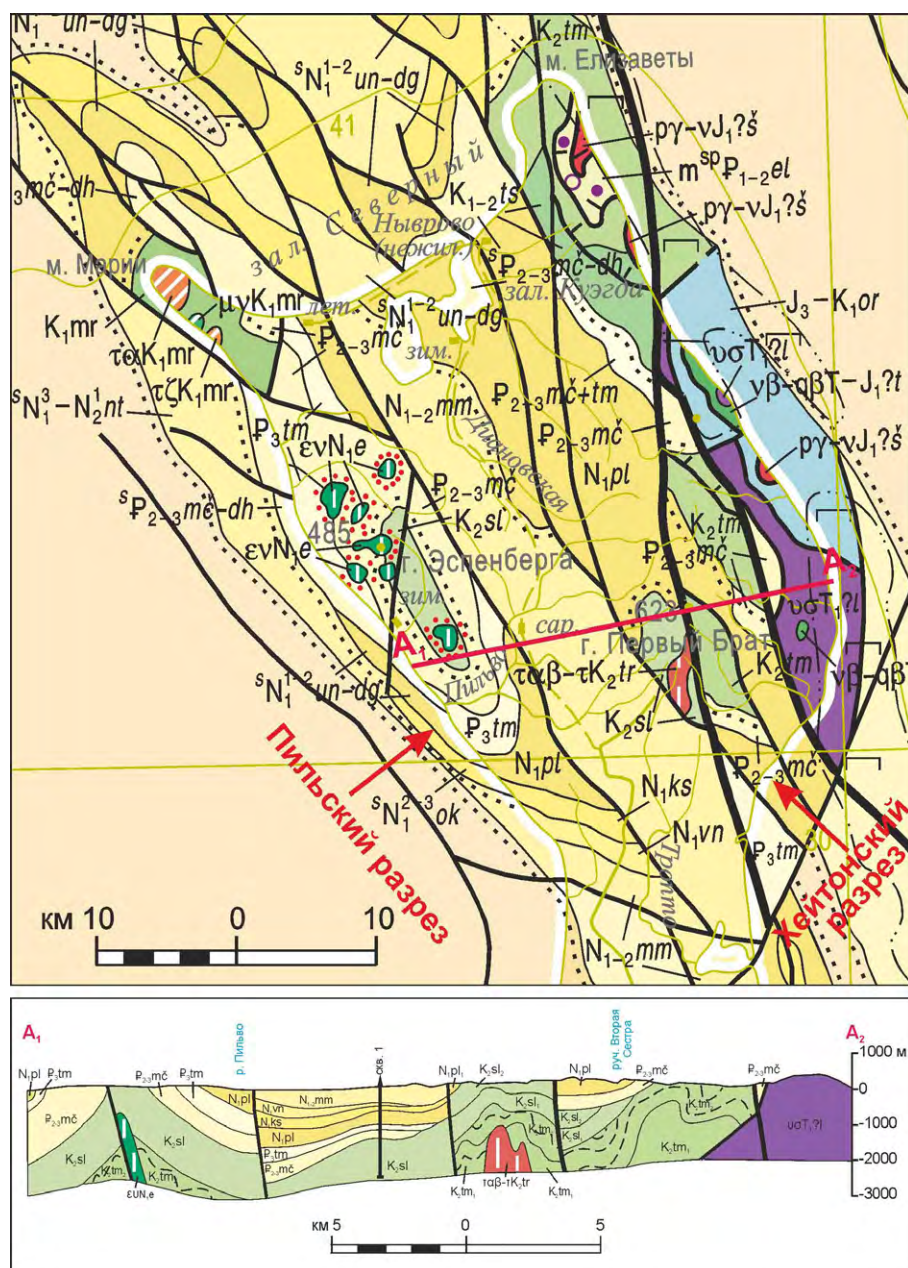


Рис. 3. Фрагмент геологической карты п-ова Шмидта м-ба 1 : 1 000 000¹. Геологический разрез по линии $A_1 - A_2$.

Figure 3. Fragment of the geological map of the Schmidt Peninsula on scale 1 : 1 000 000¹. Geological cross-section along the line $A_1 - A_2$.

¹ Государственная геологическая карта Российской Федерации масштаба 1:1 000 000. 2016. Третье поколение. Серия Дальневосточная. Лист М-54 (Александровск-Сахалинский). СПб: Картографическая фабрика ВСЕГЕИ. URL: https://www.vsegei.ru/ru/info/pub_ggk1000-3/Dalnevostochnaya/m-54.php [State geological map of Russian Federation on a scale 1:1 000 000. 2016. Third generation. Far East series. Sheet M-54 (Aleksandrovsk-Sakhalinskiy)]. Saint Petersburg: Kartograficheskaya fabrika VSEGEI.

ми района исследования являются Хейтонский и Лонгрийский разломы, которые, по данным [Кожурин и др., 2009], имеют правосдвиговую кинематику на современном этапе. Ранее В.С. Рождественским [1975] общая правосдвиговая амплитуда смещений по меловым отложениям оценивалась в 10–15 км. Но не исключались и левосдвиговые смещения. Хейтонский и Лонгрийский разломы расположены на северном окончании (продолжении) Хоккайдо-Сахалинской системы разломов в целом меридионального простирания. Для собственно Хейтонского и Лонгрийского нарушений характерно ССЗ направление простирания. Активность их подтверждается выраженностью в рельефе и палеосейсмологическими данными [Кожурин и др., 2009]. Выявленные амплитуды правосдвиговых смещений составляют, по этим данным, около 10–15 км.

Центральный блок Хейтонского разреза расположен между Хейтонским и Лонгрийским разломами и разбит на три блока нарушениями второго порядка. Разрез представляет собой почти непрерывное естественное обнажение в береговом клифе длиной около 12 км от р. Бол. Лонгра до зал. Хейтон. Тонкослоистое строение пильской свиты, обусловленное тонкими глинистыми прослоями в кремнистых породах, и хорошая обнаженность позволили оценить распределение трещиноватости и зависимость ее интенсивности от литологии породы и положения относительно структурных элементов. Влияние региональных дизъюнктивных нарушений обусловили проявление очень интенсивных дислокаций в центральной части разреза.

В процессе полевых работ мы столкнулись с крайней неоднородностью строения пильской свиты, связанной на Хейтонском разрезе прежде всего с тектоническими деформациями. Например, в зоне разлома (рис. 4) висячее крыло очень интенсивно смято в мелкие складки и передробле-

но. Характер складчатости в висячем крыле свидетельствует о сильном сжатии: складки разнонаправленные, имеют небольшие размеры (до 1 м), крылья волнистые, слои пород в ядре зачастую расходятся, местами наблюдаются зоны дробления. Лежачее крыло имеет крутые углы падения, однако слои практически не нарушены и слабо трещиноваты.

Полевые наблюдения также показали, что зона интенсивных дислокаций имеет крайне незначительную мощность – как правило, первые десятки метров (рис. 5). В зоне вышеописанного разрывного нарушения можно наблюдать, что высокая интенсивность смятия и дробления распространяется на 16 м от разлома и затем резко снижается, амплитуда складок становится меньше, исчезают зоны дробления.

Еще одна особенность, подтвержденная полевыми наблюдениями: интенсивность трещиноватости зависит от положения точки наблюдения относительно структурных элементов складки. Например, наиболее интенсивная трещиноватость наблюдается в ядре складки, вдоль осевой поверхности. Здесь, в условиях сжатия, образуются мелкие, разнонаправленные, закрытые трещины, местами – локальные зоны дробления пород. В шарнире формируются веерообразно направленные открытые складки, частота которых уменьшается от оси складки к крыльям. Таким образом, от положения относительно структурных элементов складки сильно (до 180°) зависит преобладаю-



Рис. 4. Деформации пород в крыльях разлома. П-ов Шмидта, восточное побережье, Хейтонский разрез.

Figure 4. Rock deformation in the walls of a fault. Schmidt Peninsula, East coast, Kheyton cross-section.

щее направление трещин, интенсивность и характер трещиноватости (рис. 6).

На естественных обнажениях п-ова Шмидта были проведены массовые измерения элементов залегания плоскостей трещин, определена частота их встречаемости, установлены степень и характер заполнения, а также тип трещин. Затем собранные материалы были стати-

стически обработаны, составлены диаграммы определенных систем трещин – розы-диаграммы азимутов падения, углов падения и азимутов простирания, стереограммы азимутов и углов падения трещин (рис. 7).

Еще одной задачей полевой экспедиции было изучение напряженного состояния горных пород по данным геологических инди-

каторов тектонических напряжений. Для этого проводились замеры зеркал скольжения и трещин с установленным характером смещений (здесь помимо элементов залегания плоскости разрыва измеряется еще направление ее относительной подвижки – угол скольжения). Для обработки полученных данных использовали метод катакlastического анализа разрывных смещений (МКА) [Ребецкий, 2007] и созданную на его основе компьютерную программу STRESSgeol [Ребецкий и др., 2017]. МКА позволяет определить количественные характеристики реконструируемых локальных стресс-состояний: положение осей главных напряжений, тип напряженного состояния, коэффициент Лодэ–Надаи, а также величины самих напряжений. Этот метод позволяет выделять трещины, формирующиеся в условиях активного дилатансионного расширения и в условиях компакций – объемного уплотнения. Метод основан на представлениях о квазипластическом деформировании геологической среды, установлении режима деформирования и максимуме диссипации внутренней



Рис. 5. Интенсивное смятие ослабленной части разреза в зоне разлома на Хейтонском разрезе п-ова Шмидта. Мощность зоны смятия 10–15 м.

Figure 5. Intensive deformation of the weakened part of the section in the fault zone at the Kheyton cross-section of the Schmidt Peninsula. The thickness of the shear zone is 10–15 m.

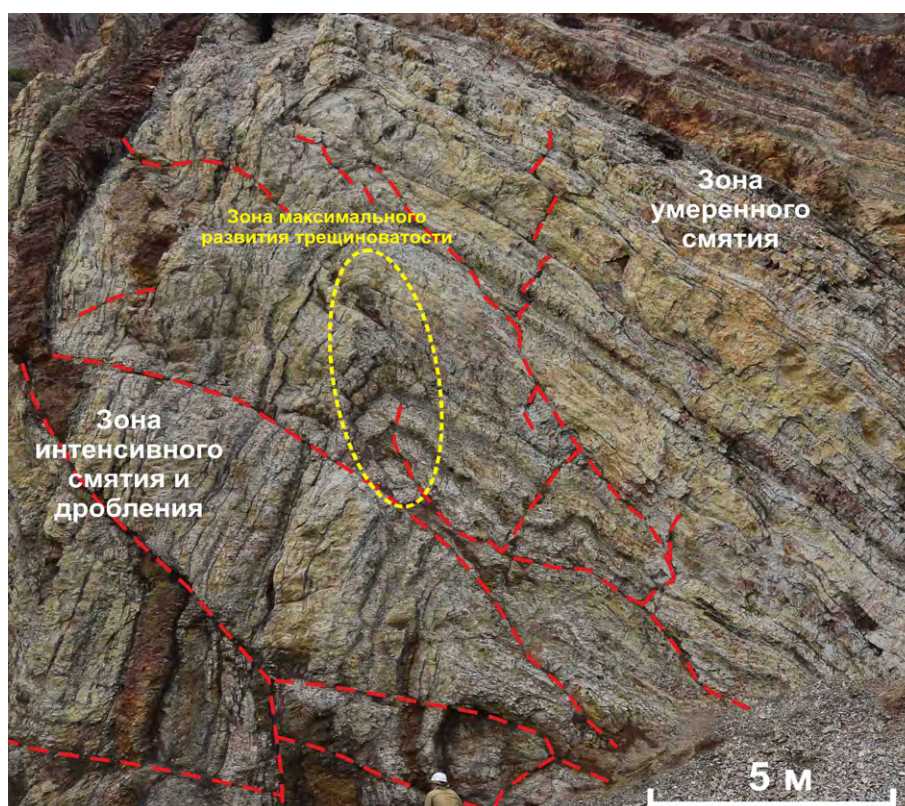


Рис. 6. Изменение интенсивности и направления трещиноватости в пределах локальной складки. Хейтонский разрез п-ова Шмидта.

Figure 6. Change in intensity and direction of fracturing within a local fold. The Kheyton cross-section of the Schmidt Peninsula.

упругой энергии для искомого тензора напряжений, положениях современной теории пластичности. Применяемая для расчетов программа STRESSgeol разделяет данные в каждой точке наблюдения на условные этапы квазиоднородного деформирования (если нет геологических сведений для предварительного разделения исходных выборок). Для разделения используется принцип достижения наибольшей суммарной энергии диссипации при минимальном количестве выделяемых фаз. Результаты проведенной тектонофизической инверсии напряжений для восточного побережья п-ова Шмидта представлены на рис. 8.

Структурно-парагенетический метод был применен для анализа систем тектонической трещиноватости разных кинематических типов с их объединением в устойчивые структурные ассоциации (парагенезы) [Расцветаев, 1987]. На восточном побережье п-ова Шмидта существенно больше различных зон дробления по сравнению с западным, что связано с более интенсивной тектонической нарушенностью и вероятным наличием дилатансионных зон (разуплотнения и трещиноватости). Здесь также можно отметить и наличие большего, чем на западном побережье, количества отрывных трещин (в том числе отрывов с минеральным выполнением). На суммарных диаграммах трещиноватости Хейтонского разреза хорошо обозначился максимум системы с СВ простиранием и крутым (вертикальным) падением. Другие максимумы связаны с СЗ простиранием двух систем с СВ и ЮЗ падениями (встречными) с углами падения около 70° (рис. 8).

В ходе исследований была проанализирована связь этих систем трещиноватости с ориентацией осей главных напряжений, полученных при реконструкции напряженно-деформированного состояния по данным о зеркалах скольжения. Изучаемый регион характеризуется напряжен-

ным состоянием с близширотной ориентацией осей наибольшего горизонтального сжатия. Реконструированные оси максимального сжатия для восточного побережья, помимо определений с субширотным направлением наибольшего горизонтального сжатия, содержат также много определений и с СВ ориентировкой.

Цель структурного анализа – изучение строения и структурной эволюции определенного сегмента земной коры, имеющего естественные пространственные ограничения [Кирмасов, 2011]. Таким сегментом может быть тектоническая зона, интрузивный массив, складка, зона дислокаций, сутура. В Пограничном прогибе мы наблюдали значительное разнообразие строения разреза, обусловленное комплексом тектонических, литологических и стратиграфических факторов.

Фундамент Пограничного бассейна сложен верхнемеловыми отложениями, они представлены стратифицированными толщами с мощными горизонтами олистостром и тектоногенными комплексами в виде линейных зон полимиктового меланжа, которые характеризуются сложным чешуйчато-надвиговым типом дислокаций [Тютрин, Дуничев, 1985]. Кайнозойские отложения относятся к эоценовой угленосной молассе (люкаминская свита), сменяющейся вверх по разрезу опоковой и кремнисто-глинистой формациями окраинного междугового бассейна,

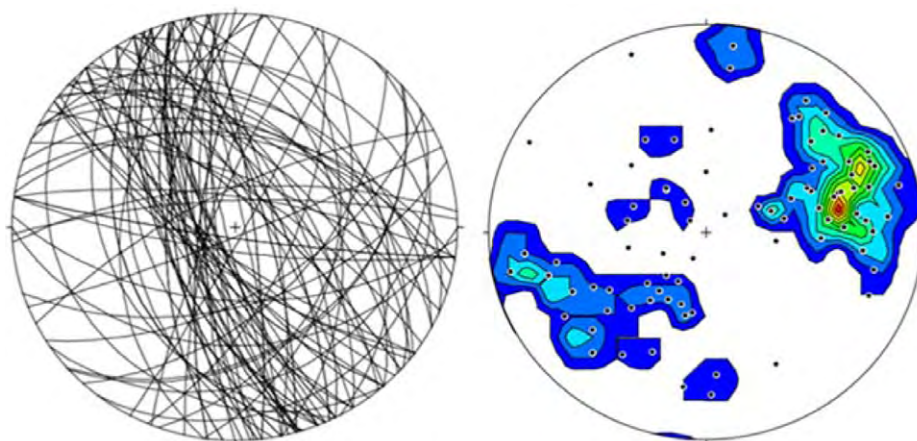


Рис. 7. Круговые диаграммы (стереографическая проекция верхней полусферы) проекций плоскостей (слева) и полюсов (справа) зон дробления восточного побережья п-ова Шмидта (Хейтонский разрез). Пример графических построений в программе StereoNET.

Figure 7. Circle diagrams (stereographic projection of the upper hemisphere) of the projections of planes (left) and poles (right) of the crushed zones of the east coast of the Schmidt Peninsula (Kheyton section). An example of graphical constructions in the StereoNET program.

пиленгской P_{3pg} и борской N_{1br} свит (рис. 9) [Дымович и др., 2016].

Указанные особенности строения Пограничного бассейна обусловили большие различия в силе, направлении и времени

воздействия тектонических напряжений на различные блоки фундамента и осадочного чехла. Сила, направление и время воздействия напряжений сжатия и растяжения на различные блоки фундамента и осадочного чехла

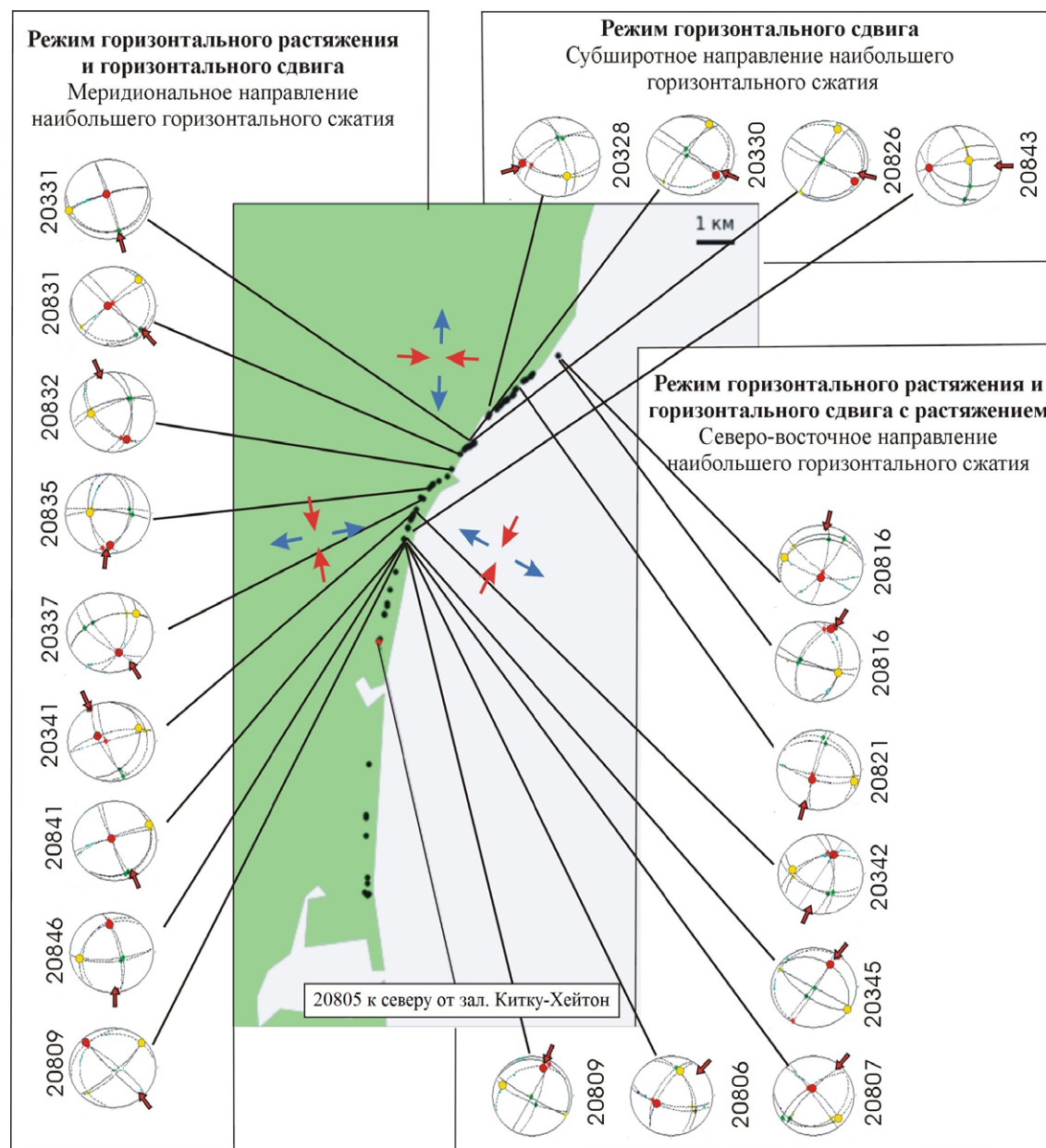


Рис. 8. Результаты тектонофизической инверсии напряжений для восточного побережья п-ова Шмидта. На карте: красными стрелками показаны оси максимального горизонтального сжатия, синими – минимального горизонтального сжатия (растяжения). На стереограммах (стереографическая проекция нижней полусферы): красный кружок – ось максимального сжатия, зеленый – промежуточная ось, желтый – ось минимального сжатия (девиаторного растяжения), красная стрелка – направление максимального горизонтального сжатия.

Figure 8. Results of tectonophysical stress inversion for the east coast of the Schmidt Peninsula. On the map: the red arrows show the axes of maximum horizontal compression, the blue ones show the axes of minimum horizontal compression (tension). On stereograms (stereographic projection of the lower hemisphere): red circle – the axis of maximum compression; green circle – the intermediate axis; yellow circle – the axis of minimum compression (deviatoric extension); red arrow – the direction of maximum horizontal compression.

были различны. Поэтому в соседних блоках, даже небольших по размерам (первые сотни метров), элементы залегания, характер и интенсивность трещиноватости (рис. 10), а при значительных подвижках и литология нередко кардинально различаются. Это отражено, в частности, и в характере распределения поля напряжения в окрестности Пограничного прогиба. Если для напряженного состояния всего Сахалина наиболее характерен геодинамический режим субширотного сжатия [Heidbach et al., 2018], то в районе 50° с.ш., ближе к охотоморскому побережью, судя по механизмам очагов землетрясений [Конвалов и др., 2014], ориентации осей сжатия и растяжения радикально меняются. Ближе к центру острова наблюдается субширотное сжатие, а восточнее – уже субмеридиональное. Кроме того, на побережье для данного района исследования, по сейсмологическим данным, отмечается режим и субмеридионального растяжения. Этот характер смены поля напряжения присущ довольно ограниченной в масштабах острова площади, приблизительно $0.5^\circ \times 0.5^\circ$. Судя по геологическим и геофизическим признакам, в данном районе имеет место ярко выраженная аномалия поля напряжения. В геологическом отношении это, в частности, проявляется в резкой смене напластования от практически горизонтального до субвертикального (рис. 10). Такой резкий контраст можно наблюдать в масштабе нескольких сотен метров.

Наиболее интенсивная тектоническая активность Пограничного прогиба в условиях мощного сжатия проявлялась на границе мезозоя и кайнозоя [Зябрев, 2011]. Результатом этой активности было образование ракитинского тектоногенного комплекса ($mpsP_{1-2}r$) и мощных горизонтов олистостром в березовской свите (K_2br). Березовская свита объединяет мощную толщу терригенных образований (алевролитов и песчаников) с горизонтами олистостром, включающих линзы и блоки тектонизирован-

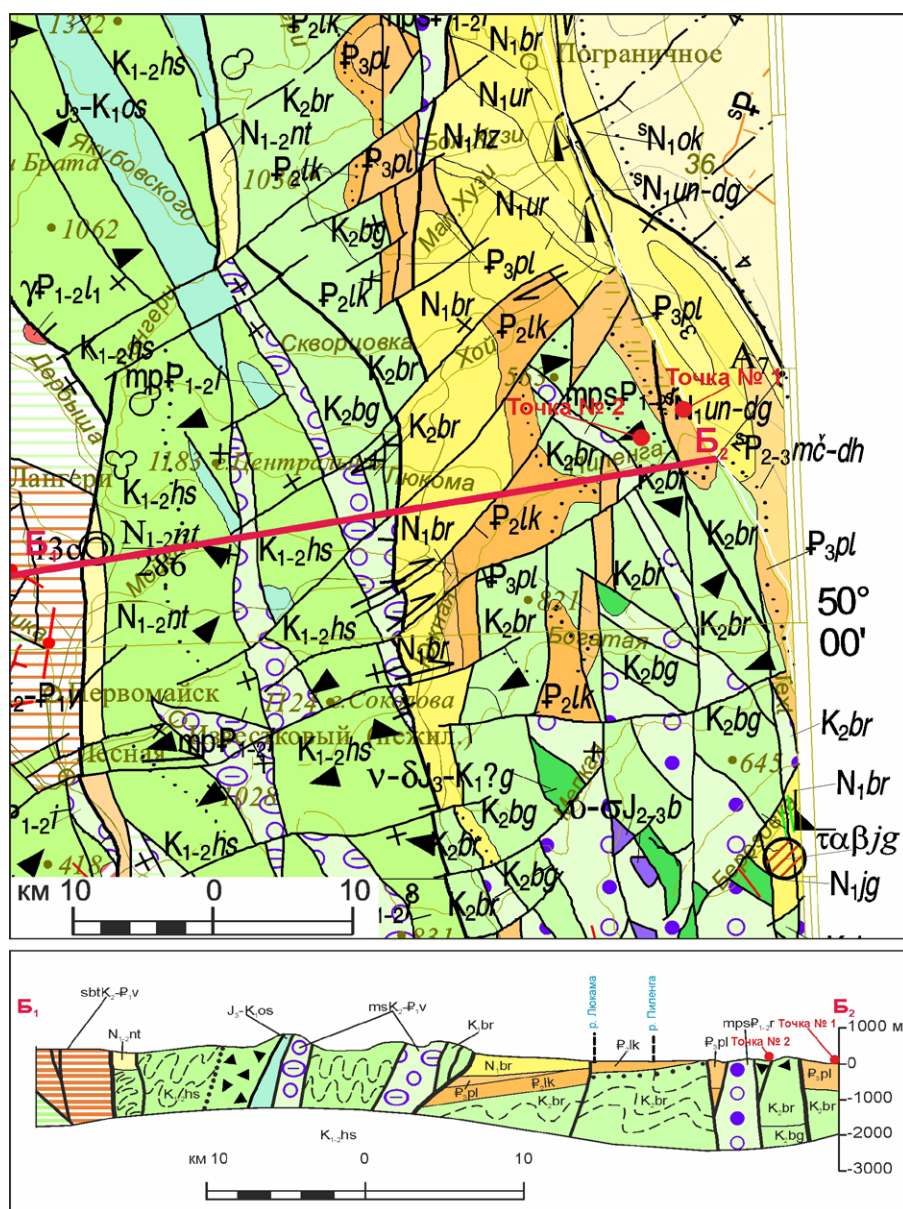


Рис. 9. Пограничный прогиб. Фрагмент Государственной геологической карты м-ба 1 : 1 000 000² и разрез по линии Б₁ – Б₂.

Figure 9. Pogranichniy depression. Fragment of the State geological map on a scale 1 : 1 000 000² and the cross-section along the line Б₁ – Б₂.

² Государственная геологическая карта... [State geological map...]

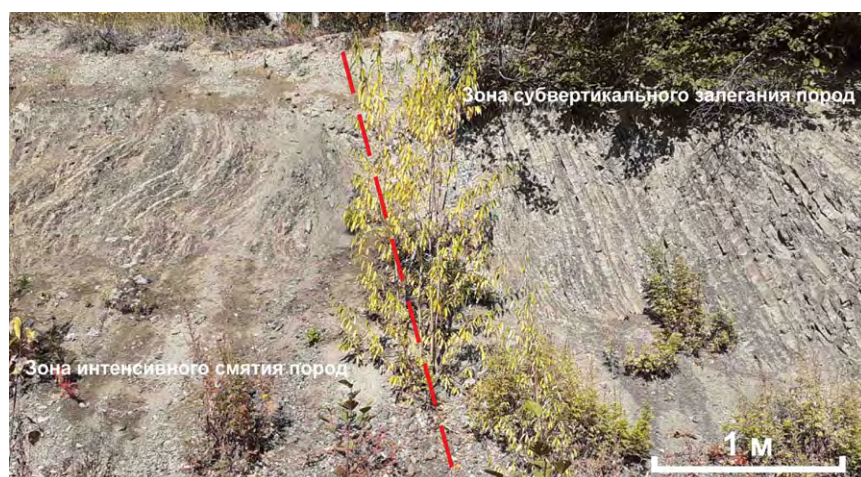


Рис. 10. Точка наблюдения 1. Пограничный прогиб, р. Пиленга, березовская свита (K_2br). Крутые падения пород, зона смятия, зона разлома. Красной линией здесь и на рис. 11 обозначены разрывные нарушения.

Figure 10. Observation point 1. Pogranichniy depression, Pilenga River, Berzovskaya formation (K_2br). High angle dip of strata, folding shear zone and fault zone. The red line indicates a fault core.



Рис. 11. Точка наблюдения 2. Пограничный прогиб, р. Пиленга, пиленгская свита. Пологое залегание пород. Плотность трещин выше в верхней, более кремнистой пачке.

Figure 11. Observation point 2. Pogranichniy depression, Pilenga River, Pilenga formation. Low angle dip of strata. The joints density is higher in the upper part with more siliceous bed.

ных вулканогенно-кремнистых и интрузивных пород. При общей выдержанности состава по латерали, набор слагающих олистоострому олистолитов существенно варьирует. Зоны полимиктового меланжа ракитинского тектоногенного комплекса осложняют структурные планы позднемеловых и более ранних образований и запечатаны эоцено-олигоценными отложениями. На основании этого возраст тектоногенного комплекса условно принят позднепалеоценовым–раннеэоценовым. Структурный план комплекса характеризуется сложным чешуйчато-надвиговым типом дислокаций. Выполнен чешуйчато-листоватым терригенно-туфокремнистым материалом со слоями кремнистых катаклазитов, реже кремнистыми, амфиболовыми и серпентинитовыми сланцами, содержащими линзы и глыбы [Гальверсен и др., 2009].

Преобладание транстенсионного режима Пограничного прогиба начиная с эоцена подтверждается строением кайнозойского разреза в районе р. Хузи, где субвертикальное залегание пород пиленгской свиты сочетается с практически полным отсутствием мелких пликтивных деформаций и трещиноватости. В северной части прогиба, в нижнем течении р. Керосинная, на протяжении 600 м в бортах и днище каньона отмечаются многочисленные дебитующие нефтепроявления, связанные с открытой трещиноватостью, которая, очевидно, свидетельствует о продолжающемся до настоящего времени режиме растяжения.

Некоторые блоки кайнозойского чехла (например, блок в районе р. Пиленга) практически не испытывали тектонического воздействия, о чем свидетельствуют пологие элементы залегания и незначительное количество трещин и зеркал скольжения. В этих условиях интенсивность трещиноватости зависит в первую очередь от литологии. Особенно наглядно такая зависимость наблюдается в верхней части пильской свиты, где чисто кремнистый разрез переходит в кремнисто-глинистый (рис. 11). В структуре замеров зеркал скольжений преобладают сбросовые, реже сдвиговые кинематические типы разрывов, что вполне соответствует результатам работ по региональной тектонике [Тютрин, Дуничев, 1985; Рождественский, 1975; Воейкова и др., 2007]. Резкая неоднородность поля напряжения, отраженная в характере элементов залеганий, структурных нарушений и парагенезов, указывает на необходимость дополнительного изучения данного района. Поэтому коллективом авторов в 2021 г. запланирован большой объем полевых работ в районе Пограничного прогиба.

Заключение

Интенсивность трещиноватости кайнозойских отложений в районах исследования сильно зависит от литологии, расстояния точки относительно разлома и от оси пликтивных структур. Направление трещин меняется в зависимости от положения относительно элементов локальных складок и от положения блока (при мелкоблочном строении). Для максимального учета геологической ситуации замеры трещиноватости проводились систематично, замерами были охвачены практически все стратиграфические подразделения и все литологические разности. В полевом журнале обязательно указывались: возраст, литология, расстояние до ближайших разломов, поло-

жение относительно элементов пликтивных структур. Полученные результаты интерпретированы отдельно по разным элементам, там, где это возможно, элементы залегания приводились к общей нормали, а показатель плотности трещин использовался только с учетом литологии.

Полевые наблюдения показали, что зона интенсивных дислокаций имеет, как правило, крайне незначительную мощность – первые десятки метров.

Отмечена резкая неоднородность поля напряжения в районах Пограничного прогиба и п-ова Шмидта, отраженная в характере элементов залеганий, структурных нарушений и парагенезов. Данный факт указывает на необходимость дополнительного изучения районов исследования. В нижнем течении р. Керосинная были отмечены нефтепроявления, свидетельствующие о вероятном режиме растяжения.

На Сахалине находится несколько подобных районов, требующих детального изучения, где граничат различные по возрасту, генезису и строению структурно-тектонические элементы: Восточно-Сахалинские горы, Сусунайский хребет, Тонино-Анивский п-ов и п-ов Терпения. Особого внимания требуют также зоны региональных разломов (Хоккайдо-Сахалинский, Центрально-Сахалинский и т.д.).

Проведенные исследования показывают, что структурный анализ в районах с такой сложной и интенсивной историей тектонического развития, как активные окраины континентов, крайне необходим для получения качественной геологической информации. Такие данные весьма актуальны как для фундаментальных исследований по тектонофизике, так и в прикладных исследованиях с целью более детального изучения нетрадиционных типов коллекторов, в частности трещиноватых.

Список литературы

1. Воейкова О.А., Несмеянов С.А., Серебрякова Л.И. **2007.** *Неотектоника и активные разломы Сахалина.* М.: Наука, 187 с.
2. Гальверсен В.Г., Евсеев С.В., Коноваленко А.А., Хайбуллина Г.А. (сост.) **2016.** *Государственная геологическая карта Российской Федерации масштаба 1 : 200 000. Серия Сахалинская. Лист М-54-XVIII (Пограничное):* Объяснительная записка. Изд. 2-е. М.: Моск. фил. ФГБУ «ВСЕГЕИ», 187 с. Рек. к печати НРС Роснедра 01.12 2009.
3. *Геология СССР. Т. 33. Остров Сахалин. Геологическое описание* (ред. В.Н. Верещагин). **1970.** М.: Недра, 432 с.

4. Гладенков Ю.Б., Баженова О.К., Гречин В.И., Маргулис Л.С., Сальников Б.А. **2002.** *Кайнозой Сахалина и его нефтегазоносность*. М.: ГЕОС, 225 с.
5. Дымович В.А., Евсеев С.В., В.Ф. Евсеев и др. (сост.) **2016.** *Государственная геологическая карта Российской Федерации масштаба 1:1 000 000. Третье поколение. Серия Дальневосточная. Лист М-54 (Александровск-Сахалинский): Объяснительная записка*. СПб: Картогр. фабрика ВСЕГЕИ, 599 с. https://www.vsegei.ru/ru/info/pub_ggk1000-3/Dalnevostochnaya/m-54.php
6. Жиров Д.В. **2019.** Информативность трещиноватости для прикладных аспектов геологии и горного дела: геометрия и строение трещин. В кн.: *Российская тектонофизика. К 100-летию юбилею Михаила Владимировича Гзовского: сборник статей* (отв. ред. чл.-корр. РАН Ю.А. Морозов). Апатиты: ФИЦ КНЦ РАН, 294–328.
7. Зябрев С.В. **2011.** Стратиграфия и структура центральной части Восточно-Сахалинской аккреционной призмы (Восток России). *Тихоокеанская геология*, 30(4): 49–73.
8. Каменев П.А., Дегтярев В.А., Костров Ю.В., Маринин А.В., Бондарь И.В., Гордеев Н.А., Халиулин Р.Р., Хмарин Э.К., Левин А.В. **2021.** Изучение трещинных коллекторов северного Сахалина в рамках комплексной экспедиции 2020 г. *Вестник ДВО РАН*, 2: 114–122.
9. Кирмасов А.Б. **2011.** *Основы структурного анализа*. М.: Научный мир, 368 с.
10. Кожурин А.И., Лободенко И.Ю., Стром А.Л. **2009.** Следы сильных землетрясений на полуострове Шмидта – северной части острова Сахалин в голоценовое время. *Геология, геофизика и разработка нефтяных и газовых месторождений*, 4: 23–29.
11. Коноваленко А.А., Васюк И.Б., Костров Ю.В. и др. **2009.** *Государственная геологическая карта Российской Федерации масштаба 1:200 000. Серия Сахалинская. Лист N-54-XXIV – Восточный: Объяснительная записка*. СПб., 91 с.
12. Коновалов А.В., Нагорных Т.В., Сафонов Д.А. **2014.** *Современные исследования очагов землетрясений о. Сахалин и механизмов их возникновения*. Владивосток: Дальнаука, 252 с.
13. Опарин В.Н., Востриков В.И., Усольцева О.М., Цой П.А., Семенов В.Н. **2015.** Комплексное исследование особенностей проявления физических полей под влиянием флюидоразрыва. Лабораторный эксперимент. *Интерэкспо Гео-Сибирь*, 2(3): 173–178.
14. Расцветаев Л.М. **1987.** Парагенетический метод структурного анализа дизъюнктивных тектонических нарушений. В кн.: *Проблемы структурной геологии и физики тектонических процессов*. М.: ГИН АН СССР, 173–235.
15. Ребецкий Ю.Л. **2007.** *Тектонические напряжения и прочность природных массивов*. М.: Академкнига, 406 с.
16. Ребецкий Ю.Л., Сим Л.А., Маринин А.В. **2017.** *От зеркал скольжения к тектоническим напряжениям. Методы и алгоритмы*. М.: ГЕОС, 234 с.
17. Рождественский В.С. **1975.** Сдвиги Северо-Восточного Сахалина. *Геотектоника*, 2: 85–97.
18. Сим Л.А., Богомолов Л.М., Брянцева Г.В., Саввичев П.А. **2017.** Неотектоника и тектонические напряжения о. Сахалин. *Геодинамика и тектонофизика*, 8(1): 181–202. <https://doi.org/10.5800/GT-2017-8-1-0237>
19. Тютрин И.И., Дуничев В.М. **1985.** *Тектоника и нефтегазоносность северо-западной части Тихоокеанского пояса*. М.: Недра, 174 с.
20. Харахинов В.В. **2010.** *Нефтегазовая геология Сахалинского региона*. М.: Научный мир, 276 с.
21. *Экосистемы кайнозоя Охотоморского региона. Опорный разрез палеогена и неогена Северного Сахалина (п-ов Шмидта): стратиграфия, палеогеография и геологические события* (отв. ред. Ю.Б. Гладенков). **1999.** М.: ГЕОС, 132 с.
22. Llanos E.M., Jeffrey R.G., Hillis R., Zhang Xi. **2017.** Hydraulic fracture propagation through an orthogonal discontinuity: A laboratory, analytical and numerical study. *Rock Mechanics and Rock Engineering*, 50: 2101–2118. doi:10.1007/s00603-017-1213-3
23. Gale J.F., Laubach S.E., Olson J.E., Eichhubl P., Fall A. **2014.** Natural fractures in shale: A review and new observations. *AAPG (Am. Assoc. Pet. Geol.) Bull.*, 98(11): 2165–2216. <https://doi.org/10.1306/08121413151>
24. Wang H.Yi. **2019.** Hydraulic fracture propagation in naturally fractured reservoirs: Complex fracture or fracture networks. *J. of Natural Gas Science and Engineering*. <https://doi.org/10.1016/j.jngse.2019.102911>
25. Heidbach O., Rajabi M. X. Cui K., Fuchs K., Müller B., Reinecker J., Reiter Tingay K.M., Wenzel F., Xie F., Ziegler M.O., Zoback M.L., Zoback M.D. **2018.** The World Stress Map database release 2016: Crustal stress pattern across scales. *Tectonophysics*, 744: 484–498. <https://doi.org/10.1016/j.tecto.2018.07.007>
26. Polets A.Yu. **2019.** The stress state of the Sakhalin Island and adjacent territories. *IOP Conf. Series: Earth and Environmental Science*, 324, 012010. <https://doi.org/10.1088/1755-1315/324/1/012010>

References

1. Voeykova O.A., Nesmeyanov S.A., Serebryakova L.I. **2007**. *Neotektonika i aktivnye razlomy Sakhalina* [Neotectonics and active faults of Sakhalin]. Moscow: Nauka, 187 p. (In Russ.).
2. Gal'versen V.G., Evseev S.V., Konovalenko A.A., Khaybullina G.A. (comp.) **2016**. [State geological map of Russian Federation on a scale of 1:200 000. Sakhalin series. Sheet M-54-XVIII (Pogranichnoe)]: [Explanatory note. Second edition]. Moscow: Moskovskiy filial FGBU «VSEGEI», 187 p. [Recommend for print by Rosnedra Scientific editorial board, December 1, 2009]. (In Russ.).
3. *Geology of USSR*. Vol. 33. *Sakhalin Island. Geological description* (ed. V.N. Vereshchagin). **1970**. Moscow: Nedra, 432 p.
4. Gladenkov Yu.B., Bazhenova O.K., Grechin V.I., Margulis L.S., Sal'nikov B.A. **2002**. [The Cenozoic of Sakhalin and its petroleum potential]. Moscow: GEOS, 225 p. (In Russ.).
5. Dymovich V.A., Evseev S.V., Evseev V.F. et al. (comp.) **2016**. [State geological map of Russian Federation on a scale of 1:1 000 000. State geological map of Russian Federation on a scale of 1:1 000 000. Third generation. Far East series. Sheet M-54 (Aleksandrovsk-Sakhalinskiy)]: [Explanatory note]. Saint Petersburg: Kartograficheskaya fabrika VSEGEI, 599 p. (In Russ.).
https://www.vsegei.ru/ru/info/pub_ggk1000-3/Dalnevostochnaya/m-54.php
6. Zhiron D.V. **2019**. [Information capacity of jointing for applied aspects of geology and mining industry: geometry and structure of cracks]. In: Yu.A. Morozov (ed.) [Russian tectonophysics. For the centenary of Mikhail V. Gzovskii]: [collection of articles]. Apatity: FITs KNTs RAN, 294–328. (In Russ.).
7. Zhabrev S.V. **2011**. Stratigraphy and structure of the central East Sakhalin accretionary wedge (Eastern Russia). *Russian J. of Pacific Geology*, 5(4): 313–335.
8. Kamenev P.A., Degtyarev V.A., Kostrov Yu.V., Marinin A.V., Bondar' I.V., Gordeev N.A., Khaliulin R.R., Khmarin E.K., Levin A.V. **2021**. Study of fractured reservoirs in Northern Sakhalin as part of a comprehensive expedition in 2020. *Vestnik DVO RAN*, 2: 114–122. (In Russ.). doi:10.37102/0869-7698_2021_216_02_12
9. Kirmasov A.B. **2011**. [Fundamentals of structural analysis]. Moscow: Nauchnyy mir, 368 p.
10. Kozhurin A.I., Lobodenko I.Yu., Strom A.L. **2009**. [Evidence of strong earthquakes on the Schmidt Peninsula – northern part of Sakhalin Island in the Holocene]. *Geologiya, geofizika i razrabotka neftyanykh i gazovykh mestorozhdeniy* [Geology, geophysics and development of oil and gas fields], 4: 23–29. (In Russ.).
11. Konovalenko A.A., Vasyuk I.B., Kostrov Yu.V. et al. **2009**. [State geological map of Russian Federation on a scale of 1:200 000. Sakhalin series. Sheet N-54-XXIV (Vostochnyy)]: [Explanatory note]. Saint Petersburg, 91 p. (In Russ.).
12. Konovalov A.V., Nagornyykh T.V., Safonov D.A. **2014**. *Sovremennyye issledovaniya ochagov zemletreseniy o. Sakhalin i mekhanizmov ikh vozniknoveniya* [Modern studies of earthquake sources mechanisms of Sakhalin Island]. Vladivostok: Dal'nauka, 252 p. (In Russ.).
13. Oparin V.N., Vostrikov V.I., Usol'tseva O.M., Tsoy P.A., Semenov V.N. **2015**. [Integrated analysis of characteristics of physical fields under effect of fluid fracturing. Laboratory experiment]. *Interekspo Geo-Sibir'*, 2(3): 173–178. (In Russ.).
14. Rastsvetaev L.M. **1987**. [Paragenetic method of structural analysis of disjunctive tectonic faults]. In: *Problemy strukturnoy geologii i fiziki tektonicheskikh protsessov* [Problems of structural geology and physics of tectonic processes]. Moscow: GIN AN SSSR, 173–235. (In Russ.).
15. Rebetskiy Yu.L. **2007**. *Tektonicheskie napryazheniya i prochnost' prirodnykh massivov* [Tectonic stresses and strength of natural massifs]. Moscow: Akademkniga, 406 p. (In Russ.).
16. Rebetskiy Yu.L., Sim L.A., Marinin A.V. **2017**. *Ot zerkal skol'zheniya k tektonicheskim napryazheniyam. Metody i algoritmy* [From slickensides to tectonic stresses. Methods and algorithms]. Moscow: GEOS, 234 p. (In Russ.).
17. Rozhdestvenskiy V.S. **1975**. [Strike-slip faults in Northeastern Sakhalin]. *Geotektonika* [Geotectonics], 2: 85–97. (In Russ.).
18. Sim L.A., Bogomolov L.M., Bryantseva G.V., Savvichev P.A. **2017**. Neotectonics and tectonic stresses of the Sakhalin Island. *Geodynamics & Tectonophysics*, 8(1): 181–202. (In Russ.). <https://doi.org/10.5800/GT-2017-8-1-0237>
19. Tyutrin I.I., Dunichev V.M. **1985**. *Tektonika i neftegazonosnost' severo-zapadnoy chasti Tikhookeanskogo poyasa* [Tectonics and petroleum potential of the northwestern part of the Pacific belt]. Moscow: Nedra, 174 p. (In Russ.).
20. Kharakhinov V.V. **2010**. [Petroleum geology of the Sakhalin region]. Moscow: Nauchnyy mir, 276 p. (In Russ.).

21. *Ekosistemy kaynozoya Okhotomorskogo regiona. Opornyy razrez paleogena i neogena Severnogo Sakhalina (p-ov Shmidta): stratigrafiya, paleogeografiya i geologicheskie sobytiya* [Cenozoic ecosystems of the Sea of Okhotsk region. The Paleogene and Neogene reference section of North Sakhalin (the Schmidt Peninsula): stratigraphy, paleogeography, and geological events] (Ed. Yu.B. Gladenkov). **1999**. Moscow: GEOS, 132 p. (In Russ.).
22. Llanos E.M., Jeffrey R.G., Hillis R., Zhang Xi. **2017**. Hydraulic fracture propagation through an orthogonal discontinuity: A laboratory, analytical and numerical study. *Rock Mechanics and Rock Engineering*, 50: 2101–2118. doi:10.1007/s00603-017-1213-3
23. Gale J.F., Laubach S.E., Olson J.E., Eichhubl P., Fall A. **2014**. Natural fractures in shale: A review and new observations. *AAPG (Am. Assoc. Pet. Geol.) Bull.*, 98(11): 2165–2216. <https://doi.org/10.1306/08121413151>
24. Wang H.Yi. **2019**. Hydraulic fracture propagation in naturally fractured reservoirs: Complex fracture or fracture networks. *J. of Natural Gas Science and Engineering*. <https://doi.org/10.1016/j.jngse.2019.102911>
25. Heidbach O., Rajabi M. X. Cui K., Fuchs K., Müller B., Reinecker J., Reiter Tingay K.M., Wenzel F., Xie F., Ziegler M.O., Zoback M.L., Zoback M.D. **2018**. The World Stress Map database release 2016: Crustal stress pattern across scales. *Tectonophysics*, 744: 484–498. <https://doi.org/10.1016/j.tecto.2018.07.007>
26. Polets A.Yu. **2019**. The stress state of the Sakhalin Island and adjacent territories. *IOP Conf. Series: Earth and Environmental Science*, 324, 012010. <https://doi.org/10.1088/1755-1315/324/1/012010>

Об авторах

КОСТРОВ Юрий Викторович, главный специалист отдела подготовки объектов геологоразведочных работ, ООО «РН-СахалинНИПИморнефть», Южно-Сахалинск, yvkostrov@snipi.rosneft.ru

ДЕГТЯРЕВ Владислав Анатольевич (ORCID 0000-0001-8922-3654), аспирант, Институт морской геологии и геофизики ДВО РАН, Южно-Сахалинск, ведущий специалист отдела подготовки объектов геологоразведочных работ ООО «РН-СахалинНИПИморнефть», Южно-Сахалинск, degtyarevvladislav96@yandex.ru

МАРИНИН Антон Витальевич (ORCID 0000-0002-1099-6492), кандидат геолого-минералогических наук, старший научный сотрудник, Институт физики Земли РАН им. О.Ю. Шмидта, Москва, marinin@yandex.ru

ХМАРИН Эдуард Константинович, начальник управления геологоразведочных работ ООО «РН-СахалинНИПИморнефть», Южно-Сахалинск, ekkhmarin@snipi.rosneft.ru

КАМЕНЕВ Павел Александрович (ORCID 0000-0002-9934-5855), кандидат технических наук, старший научный сотрудник ЦКП, Институт морской геологии и геофизики ДВО РАН, Южно-Сахалинск, p.kamenev@imgg.ru

About Authors

KOSTROV Yuri V., Head Specialist of the Department for the preparation of the geological prospects, LLC RN-SakhalinNIPImorneft, Yuzhno-Sakhalinsk, yvkostrov@snipi.rosneft.ru

DEGTYAREV Vladislav A. (ORCID 0000-0001-8922-3654), Postgraduate, Institute of Marine Geology and Geophysics, FEB RAS, Yuzhno-Sakhalinsk, Leading Specialist of the Department for the preparation of the geological prospects, LLC RN-SakhalinNIPImorneft, Yuzhno-Sakhalinsk, degtyarevvladislav96@yandex.ru

MARININ Anton V. (ORCID 0000-0002-1099-6492), Cand. Sci. (Geology and Mineralogy), Senior Researcher, Schmidt Institute of Physics of the Earth RAS, Moscow, marinin@yandex.ru

KHMARIN Eduard K., Head of geological exploration department, LLC RN-SakhalinNIPImorneft, Yuzhno-Sakhalinsk, ekkhmarin@snipi.rosneft.ru

KAMENEV Pavel A. (ORCID 0000-0002-9934-5855), Cand. Sci. (Engineering), Senior Researcher of CCU, Institute of Marine Geology and Geophysics, FEB RAS, Yuzhno-Sakhalinsk, p.kamenev@imgg.ru