

РОЛЬ РЕГИОНАЛЬНЫХ ТЕКТОНИЧЕСКИХ НАПРЯЖЕНИЙ В ГРЯЗЕВОМ ВУЛКАНИЗМЕ ЮЖНОГО САХАЛИНА

© 2024 П.А. Каменев

*Институт морской геологии и геофизики ДВО РАН, Южно-Сахалинск, Россия, 693022;
e-mail: p.kamenev@imgg.ru*

Поступила в редакцию 08.06.2024; после доработки 03.09.2024; принята в печать 25.09.2024

Работа посвящена исследованию поля тектонических напряжений Южного Сахалина на основе сейсмологических, геологических, тектонофизических, GPS и дистанционных (спутниковых) методов. Для юга Сахалина наиболее характерным типом напряженного состояния земной коры является широтное — субширотное горизонтальное сжатие. Характеру этого состояния полностью соответствует поле, формирующее морфологию Пугачевских и Южно-Сахалинского грязевых вулканов, а также форму и ориентацию их литокластитовых полей. С помощью снимков дополнены результаты предыдущих исследователей по изучению направлений грифонных полос, а также измерены азимуты простираний литокластитовых полей этих вулканов. Полоса литокластитовых полей на Пугачевском вулкане простирается по азимуту 25°, а Южно-Сахалинском грязевом вулкан — по азимуту 30°, что вполне соответствует полю региональных тектонических напряжений. Показана целесообразность использования дистанционных (спутниковых) методов в качестве дополнения к геологическим и геофизическим методам, в частности и скважинной кавернометрии.

Ключевые слова: грязевой вулканизм, тектонические напряжения, кавернометрия, механизмы очагов землетрясений.

ВВЕДЕНИЕ

Исследование тектонических напряжений является одной из важнейших задач целого ряда фундаментальных и прикладных дисциплин наук о Земле (Heidbach et al., 2018; Zoback, 2007). Такие исследования в зоне перехода континент-океан и границ тектонических плит актуальны для региональной геодинамики.

Не менее важно изучение напряжений и для развивающихся нефтегазовых, угледобывающих и инфраструктурных проектов о. Сахалин, в которых активно применяется геомеханика. Сегодня геомеханика развивается не только в горнодобывающей отрасли, но и все чаще внедряется в нефтегазовую отрасль. Строительство современной скважины и ее эксплуатация в большинстве случаев уже немыслима без этой дисциплины (Dubinya et al., 2017; Fjær et al., 2008; Zoback, 2007).

Количество и качество геомеханических работ на месторождениях неуклонно возрастает, как за рубежом, так и в нашей стране. Значитель-

ную роль играет применение дорогостоящей аппаратуры, для обеспечения функционирования которой необходимо понимание геологических условий и минимизация их негативных последствий (Смирнов и др., 2024, Kruszkowski et al., 2022).

Для таких работ необходимо знание характеристик локального и регионального полей тектонических напряжений. В то же время, информация о тектонических напряжениях в нашей стране не систематизирована (Ахметов и др., 2015; Козырев, Савченко, 2009; Леонтьев, 2001; Heidbach et al., 2018).

Вместе с тем, в целом ряде зарубежных публикаций (Bonini, 2008, 2012; Hui et al., 2008; Viola et al., 2005 и др.) обосновывается такой способ реконструкции региональных тектонических напряжений, как изучение грязевых вулканов.

В настоящей статье предпринята попытка обобщения региональных данных о тектонических напряжениях юга Сахалина и их уточнение на основе изучения грязевых вулканов.

РАЙОН И ОБЪЕКТЫ ИССЛЕДОВАНИЯ

Грязевой вулканизм Сахалина представлен преимущественно в южной части острова, хотя проявления отмечены и в его северной части (Мельников, 2004; Сирьк, 1968). Наиболее выраженные и представительные грязевые вулканы юга Сахалина — группа Пугачевских и Южно-Сахалинский (рис.1). Несмотря на очевидную уникальность этих геологических объектов, степень их изученности остается невысокой. Изучение грязевых вулканов Сахалина было начато еще японскими исследователями в 1920–1930 гг. прошлого века (Сайто, 1959; Уэда 1948). В советское время исследования грязевого вулканизма были продолжены (Мельников, 2004 и др.). Относительно современные геофизические исследования приведены в работах (Аргентов и др., 2001; Прытков и др., 2014), а также геохимические исследования (Ершов, 2013; Никитенко, Ершов, 2020 и др.). Значительное количество публикаций посвящено активности грязевых вулканов в связи с сейсмичностью (Астахов и др., 2002, Мельников и др., 2008 и др.).

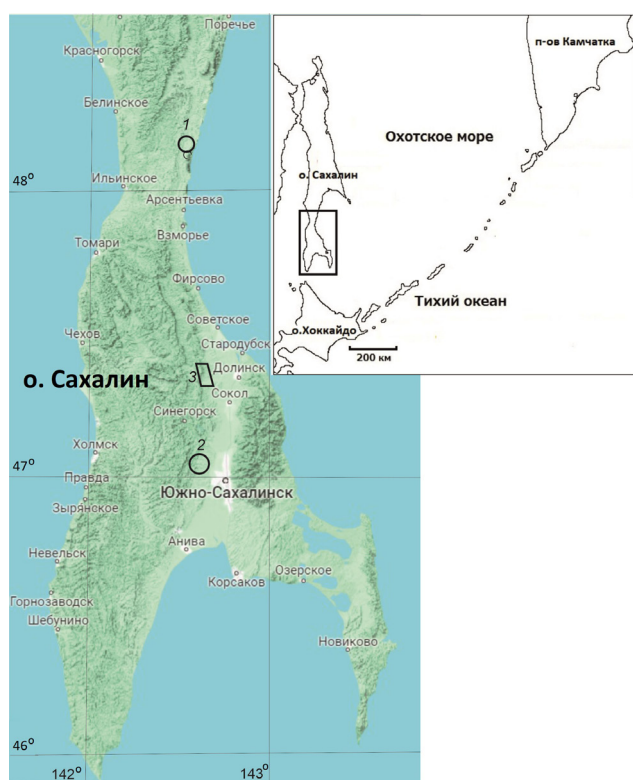


Рис. 1. Район исследования — Южный Сахалин с Пугачевскими (1) и Южно-Сахалинским (2) грязевыми вулканами, а также Лопатинским угольным месторождением — шахта Долинская (3).

Fig. 1. The study area is South Sakhalin with the Pugachevsky (1) and Yuzhno-Sakhalinsky (2) mud volcanoes and the Lopatinsky coal field — Dolinskaya mine (3).

Группа Пугачевских грязевых вулканов находится приблизительно в 150 км севернее г. Южно-Сахалинск (рис. 1), она состоит из трех отстоящих друг от друга самостоятельных вулканов: Центрального (Главного), и двух Малых — Северного и Южного (рис. 2а). В морфологическом плане они представляют собой лепешкообразное поле практически правильной округлой формы, диаметром до 100–200 м у Главного вулкана, и до 50 м у Малых вулканов (рис. 2а). Продукты их эксплозии — литокластические массы, внешне напоминающие свежевспаханное поле.

Пугачевские грязевые вулканы локализируются в районе выхода на дневную поверхность меловых пород Сахалина (Опорный..., 1987; Сирьк, 1970), мощностью около 4–5 км, в которой выделяют сверху вниз — красноярковскую (K_2kr), быковскую (K_2bk) свиты, верхнюю часть найбинской (K_2nb_2) и айскую свиту (K_1as). Верхняя (красноярковская) свита сложена песчаниками, а в двух нижних (найбинской и айской) преобладают алевролиты и аргиллиты. По материалам сейсморазведки методом общей глубинной точки, Пугачевские грязевые вулканы расположены в субмеридионально протяженной антиклинальной складке (Веселов и др., 2012). С запада складка ограничена субмеридиональным разрывным нарушением взбросо-надвигового типа. Разлом осложнен поперечными сдвигами, разделяющими складку на систему самостоятельных блоков. С юга, свод Пугачевской антиклинальной складки ограничен одним из этих сдвигов. На северном и восточном бортах складка сопряжена с небольшими синклиналями (Веселов и др., 2012).

Южно-Сахалинский вулкан, находится в 20 км к северо-западу от областного центра, и представляет собой вытянутый на 1.5 км в меридиональном направлении пологий холм, густо заросший лесом (рис. 1, 2б). Привершинная часть холма, покрыта литокластическими массами — следами эксплозивной деятельности вулкана. Длины потоков изверженных масс иногда достигают 500–600 м (Мельников, 2004). Вулкан расположен в высокопластичной алевролито-аргиллитовой верхнемеловой толще — быковской свиты (K_2bk) с мощностью до 3000 м (Мельников, 2002). Анализ геологических карт и разрезов района исследования позволяет предположить его генетическую связь со следующими местными стратиграфическими подразделениями: холмской ($P_3-N_1h_1$), красноярковской (K_2kr), найбинской ($K_{1,2}nb$) и айской (K_1as) свитами (Верхотуров, 2024). Южно-Сахалинский грязевой вулкан находится в зоне регионального Центрально-Сахалинского (Тынь-Поронайского) разлома (Астахов и др., 2002; Сирьк, 1968). В районе этого вулкана



Рис. 2. Геометрия Пугачевских (а) и Южно-Сахалинского (б) грязевых вулканов. S_H — максимальное горизонтальное напряжение, S_h — минимальное горизонтальное напряжение. Черной линией отмечена полоса литокластитовых полей вулканов. Цифрами на (а) обозначены: 1 — Южный, 2 — Центральный (Главный), 3 — Северный вулкан; на (б): 1 — Южное, 2 — Северное литокластитовые поля.

Fig. 2. Geometry of Pugachevsky (a) and Yuzhno-Sakhalinsk (b) mud volcanoes. S_H is the maximum horizontal stress, S_h is the minimum horizontal stress. The band of lithoclastite fields of the volcanoes. Numbers in (a) indicate: 1 — Southern, 2 — Central (Main), 3 — Northern volcano; Numbers in (b) mark Southern (1) and Northern (2) lithoclastite fields.

главный сместитель Центрально-Сахалинского взбросо-надвига имеет прямолинейное север-северо-восточное простирание. Амплитуда перемещения по нему составляет не менее 3–4 км (Мельников, 2002). Остальные разрывные нарушения являются оперяющими Центрально-Сахалинский взбросо-надвиг.

Среди современных статей по геоморфологии грязевых вулканов Сахалина, которые могли бы способствовать оценкам характера деформаций ландшафта в их окрестности, можно выделить недавние публикации (Жарков, Козлов, 2021; Мишурицкий и др., 2018). В работе (Жарков, Козлов, 2021), отмечено, что на Главном Пугачевском грязевом вулкане зафиксировано два новообразованных по сравнению с предыдущими годами грязевых поля. Западное поле в мае 2021 г. имело округлую форму и диаметр 75 м, его площадь около 4600 м², объем грязевой массы оценен приблизительно в 1400 м³. Восточное поле в 2020 г. было ориентировано в северо-западном направлении с размерами 124×113 м. В 2021 г. новообразованное поле из изверженной грязевой массы было вытянуто в северо-восточном направлении, с размерами 166×137 м и площадью

около 18000 м², объем свежей грязевой массы оценен приблизительно в 13000 м³.

СТЕПЕНЬ ИЗУЧЕННОСТИ ПОЛЯ НАПРЯЖЕНИЯ

Традиционно проявления грязевого вулканизма связывалось с нефтегазоносностью региона (Сирьк, 1968; Якубов и др., 1980). Это подтверждается в активной нефтегазодобыче Сахалина (Веселов и др., 2012; Гладенков и др., 2002; Сирьк, 1968; Якубов и др., 1980). Рядом исследователей грязевая вулкан рассматривается как природная скважина (Ершов, 2013; Mazzini, Giuseppe, 2017) и это на наш взгляд весьма уместная аналогия. При этом известно, что скважины являются ценным источником информации о напряженно-деформированном состоянии литосферы и в частности конкретных участков или месторождений (Дубиня, 2019). Весьма емко об этом свидетельствует глобальный проект The World Stress Map (WSM), где скважинные данные вносят довольно весомый вклад в реконструкцию глобального поля напряжений (Heidbach et al., 2018). В частности, этот проект отражает и поле

напряжений Сахалина. Главным источником данных о напряжениях этого проекта, являются механизмы очагов землетрясений. Причем для территории Российской Федерации эти данные весьма скупы. Результаты проекта WSM активно используются не только фундаментальной наукой, но и практически в каждом геомеханическом проекте, связанном с добычей природных ресурсов (Kruszewski et al, 2022; Zoback, 2007). В России существуют схожие проекты (Ахметов и др., 2015; Козырев, Савченко, 2009; Леонтьев, 2001). Но в отличие от глобального проекта WSM, они были реализованы преимущественно на одном типе информации: или на основе механизмов очагов землетрясений, или на натуральных измерениях в рудниках. Скважинные данные в них, как правило, не представлены. К сожалению, при реализации этих проектов отсутствовала интеграция производства и академической науки. Совместный проект, объединяющий данные для территории Российской Федерации, был бы, по нашему мнению, крайне полезен и фундаментальной и прикладной науке.

Своеобразной региональной альтернативой проекту WSM можно считать работу (Коновалов и др., 2014), в которой на основе механизмов очагов была проведена более детальная по сравнению с WSM реконструкция ориентации осей напряжений сжатия и растяжения в эпицентральных зонах сахалинских землетрясений в период за 1962–2011 гг. с $MLH \geq 4.6$ (рис. 3). Согласно этому рисунку, для южной части о. Сахалин характерна широтная и субширотная ориентация максимального горизонтального напряжения.

В работах (Татаурова, 2015; Polets, 2019) на основе механизмов очагов землетрясений и метода катакластического анализа (МКА) были реконструированы современные поля напряжений и деформаций о. Сахалин, и показано, что наиболее характерным типом напряженного состояния является горизонтальное сжатие. Направление всех осей близко к субширотному.

Другим источником информации о напряжениях являются геологические методы, которые мало используются в глобальном проекте WSM, но достаточно качественно представлены для территории Южного Сахалина (Сим и др., 2017; Bogomolov et al., 2020). В цитируемых работах новейшая тектоника Сахалина была реконструирована с помощью структурно-геоморфологического, полевых структурных и тектонофизических методов. (рис. 4а). Преимущество структурно-геоморфологического метода — охват всей территории о. Сахалин, но при этом относительно малое количество значений осей сжатия и растяжения. К недостаткам полевых тектонофизических методов

реконструкции локального стресс состояния (ЛСС) в этих работах, можно отнести достаточно низкую плотность данных, поскольку, для огромной территории Юга Сахалина выполнено всего лишь 49 определений ЛСС (Сим и др., 2017; Bogomolov et al., 2020). Тем не менее, это весьма существенный вклад в реконструкцию поля напряжений о. Сахалин и нужно отметить, что в настоящее время эта работа продолжается, а количество определений ЛСС с каждым годом увеличивается (Каменев, Маринин, 2023; Каменев и др., 2023). Результаты структурно-геоморфологического метода (Сим и др., 2017; Bogomolov et al., 2020) в районе грязевых вулканов (рис. 1), показывают субширотную ориентировку осей сжатия. Сжатие, реконструированное с помощью полевых тектонофизических методов также имеет субширотную ориентацию (рис. 4а). Таким образом, с помощью комплекса структурных и тектонофизических методов в работах (Сим и др., 2017; Bogomolov et al., 2020) показано очевидное субширотное сжатие поля напряжения южной части о. Сахалин.

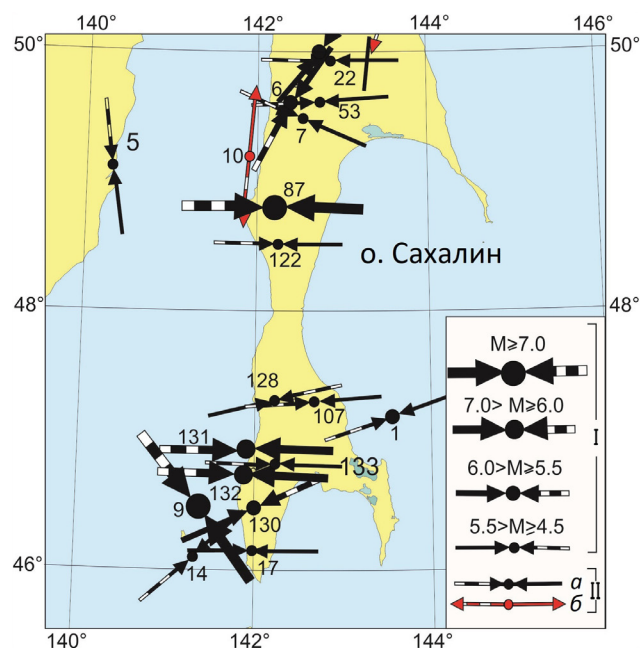


Рис. 3. Ориентации осей напряжений сжатия и растяжения в эпицентральных зонах сахалинских землетрясений в период за 1962–2011 гг. с $MLH \geq 4.6$. Цифрами на карте обозначены порядковые номера землетрясений представленные в каталоге (Коновалов и др., 2014). I — классификация землетрясений по магнитуде; II — оси напряжений: a — оси сжатия, б — оси растяжения.

Fig. 3. Orientations of compression and tension stress axes in epicentral zones of Sakhalin earthquakes during 1962–2011 with $MLH \geq 4.6$. Numbers on the map indicate serial numbers of earthquakes presented in the catalog (Konovalov et al., 2014). I — classification of earthquakes by magnitude; II — stress axes: a — compression, б — extension.

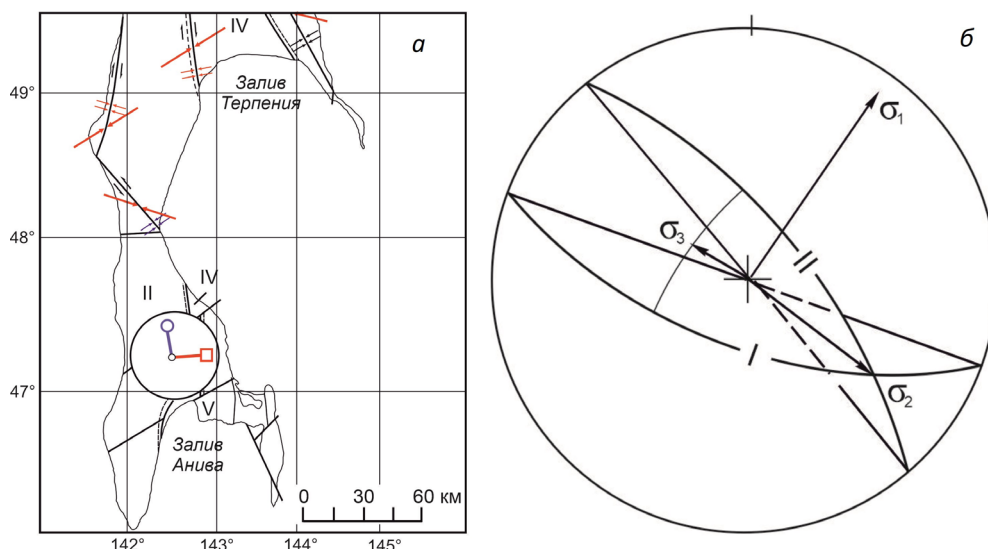


Рис. 4. Схема новейшей геодинамики о. Сахалин (Сим и др., 2017; Bogomolov et al., 2020) (а) and тектоническое поле напряжения шахты Долинская (б). Круговая диаграмма отражает равноугольную стереографическую проекцию на верхнюю полусферу; показано положение осей главных напряжений на равноугольной стереографической проекции на верхнюю полусферу (σ_1 — растяжения; σ_2 — промежуточные главные; σ_3 — сжатия), (Шпеталенко и др., 1976).

Fig. 4. Scheme of the neotectonic geodynamics of Sakhalin (Sim et al., 2017; Bogomolov et al., 2020). (a) and tectonic stress field in the Dolinskaya mine (b). Pie chart reflects the position of the principal stress axes on the upper hemisphere in the equiangular stereographic projection (σ_1 — extension; σ_2 — intermediate; σ_3 — compression) (Shpetalenko et al., 1976).

Результаты изучения напряженно-деформированного состояния земной поверхности Южного Сахалина структурными геологическими методами представлены в работах (Голозубов и др., 2012; Сим и др. 2020). В статье (Голозубов и др., 2012) показано, что для юго-запада Сахалина преобладает обстановка ориентированного в ВСВ (до широтного, 60–90°) направления регионального сжатия. На отдельных участках Южного Сахалина установлены также следы сжатия, направленного с юго-востока на северо-запад. В работе (Сим и др. 2020) на основе изучения будинажа и оценки деформаций растяжения, установлены индикаторы раннепостмиоценовых напряжений для юго-запада Сахалина (г. Невельск). Показано, что ось сжатия направлена по азимуту 92.5°, а ось растяжения — по азимуту 182.5°.

Следующим достаточно «экзотичным» для Сахалина методом оценки напряжений является реконструкция локального поля напряжений в шахте Долинская, Лопатинского угольного месторождения (рис. 1, 4б) с помощью графического метода определения ориентировки осей напряжений по трещинам и разрывным нарушениям М.В. Гзовского (Каменев, Маринин, 2023; Шпеталенко и др., 1976). Это достаточно ценный источник информации, поскольку шахт на Сахалине больше нет, они ликвидированы и добыча угля теперь ведется открытым способом. Бывшая шахта Долинская находится в отно-

сительной близости с Пугачевскими и Южно-Сахалинским грязевыми вулканами. (рис. 1). Проведенная в работе (Шпеталенко и др., 1976) реконструкция показывает, что ось растяжения главных нормальных напряжений ориентирована по азимуту падения 215°±5°, ось сжатия — по азимуту падения 120°±30° и промежуточная ось ориентирована по азимуту падения 315° ± 65° (рис. 4б). Таким образом, поле напряжения в окрестности шахты Долинская характеризуется субширотным сжатием.

Другой источник информации о характере напряженно-деформированного состояния в окрестности грязевых вулканов — данные GPS наблюдений. В окрестности Южно-Сахалинского грязевого вулкана такие работы проводились (Прытков и др., 2014). Для изучения особенностей распределения смещений и деформаций земной поверхности в окрестности Южно-Сахалинского грязевого вулкана была построена временная локальная сеть из 5 пунктов наблюдений, которая контролировала основные разрывные нарушения в зоне Центрально-Сахалинского разлома. Проведен анализ деформаций в виде скоростей смещений подвижных пунктов относительно опорной станции непосредственно перед извержением вулкана. По данным обработки GPS наблюдений в окрестности вулкана до его эксплозии, наблюдалось горизонтальное сжатие земной поверхности вкрест простирания главного сместителя Центрально-Сахалинского

разлома. Скорость субширотного сжатия составляла 2–4 мм/год, это согласуется с общим характером современного поля напряженно-деформированного состояния Южного Сахалина. В результате извержения в окрестности грязевого вулкана произошли существенные вертикальные и горизонтальные смещения земной поверхности. Максимальные смещения наблюдались на западном крыле Центрально-Сахалинского разлома, при этом пункты наблюдения опустились на 23 мм и сместились в восточном направлении на 17 и 34 мм. Горизонтальные и вертикальные смещения пунктов восточного крыла разлома имеют меньшую величину, только на одном пункте наблюдения вертикальное смещение составило 15 мм (Прытков и др., 2014).

Сравнение различных методик реконструкции поля напряжений показывает, что для юга Сахалина характерно широтное–субширотное сжатие. Скважинные данные для территории настоящего исследования практически отсутствуют. Это объясняется относительно невысокими (по сравнению с Северным Сахалином) объемами бурения. И здесь нужно вспомнить, что грязевые вулканы весьма справедливо рассматриваются как природные скважины. В этом смысле, мы можем извлечь из них в частности и информацию о тектонических напряжениях региона. Что весьма отчетливо показано в ряде зарубежных работ (Bonini, 2008, 2012; Hui et al., 2008; Viola et al., 2005 и др.).

ПОЛЕ НАПРЯЖЕНИЙ В ОКРЕСТНОСТИ ГРЯЗЕВЫХ ВУЛКАНОВ

Отечественные исследования поля тектонических напряжений грязевых вулканов крайне немногочисленны. Реконструкция напряженно-деформированного состояния грязевых вулканов Сахалина частично отражена в работе (Прытков и др., 2014). На территории Российской Федерации также были проведены структурно-геологические работы в окрестности грязевых вулканов Керченского и Таманского п-вов, в результате которых был установлен характер их напряженно-деформированного состояния (Тверитинова и др., 2020; Тверитинова, Белобородов, 2020). За рубежом, этим исследованиям посвящено достаточно много работ (Bonini, 2008; Hui et al., 2008; Viola et al., 2005 и др.). В цитируемых работах показано, что грязевой вулкан действительно представляет собой природную скважину, и в этом смысле мы можем рассматривать его в качестве альтернативы скважинной кавернометрии. А именно, форма литокластитовых полей грязевых вулканов подвержена деформациям подобно стволу скважины (Дубиня, 2019; Abdideh, Dastyaft, 2021), и по его

геометрии мы можем судить о действии на него главных напряжений (рис. 5). Подобные зависимости деформаций вулканов можно проследить и в других зарубежных источниках (Nakamura et al., 1977; Paulsen, Wilson, 2007).

В работе (Мельников, 2011) выделена важная особенность в деятельности Пугачевских грязевых вулканов — достаточно строго соблюдаемое общее северо-восточное направление грифонной полосы, протягивающейся через Главный вулкан (рис. 1 и 2а). Азимут простирания этой полосы в 1938 г. составлял 50° по данным (Уэда, 1948), а в 1999 г. по наблюдениям (Мельников, 2011) — 53° . Кроме этих данных, для оценок характера тектонических напряжений, интересна и ориентация литокластитовых полей, а также их совместное рассмотрение с направлением простирания грифонных полос. С этой целью, на космостимке проведены субмеридиональные линии соединяющие литокластитовые поля грязевых вулканов (рис. 2). Проведенный анализ показал, что азимут простирания литокластитовых полей группы Пугачевских грязевых вулканов составляет 25° , Южно-Сахалинского — 30° . На наш взгляд, ориентация литокластитовых полей вполне соответствует полю региональных тектонических напряжений. Более интересны, с этой точки зрения, контуры самих литокластитовых полей в плане. Для более наглядного представления характера их деформаций, по границам полей прочерчены окружности (рис. 2).

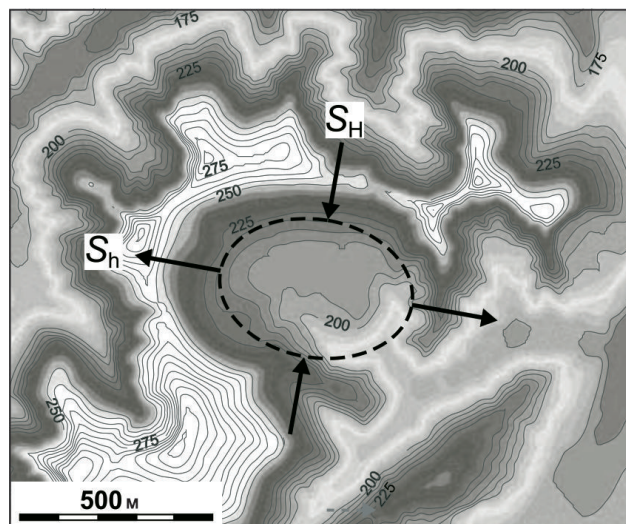


Рис. 5. Действие главных напряжений литокластитовое поле грязевого вулкана Нирано (Италия) (Bonini, 2008). S_H — максимальное горизонтальное напряжение, S_h — минимальное горизонтальное напряжение. Изогипсы в метрах.

Fig. 5. Impact of the principal stresses on the lithoclastite field of the Nerano mud volcano, Italy (Bonini, 2008). S_H is the maximum horizontal stress, S_h is the minimum horizontal stress. Isohypses are in meters.

Такой способ представления позволяет с уверенностью сказать, что взрывные поля Пугачевских грязевых вулканов вытянуты в субмеридиональном направлении. Южного вулкана в меридиональном направлении, Центрального — практически в меридиональном направлении с азимутом простирания 355° и малого Северного с азимутом 330° (рис. 2а). Еще более отчетливая картина наблюдается и для полей Южно-Сахалинского вулкана (рис. 2б). Южное литокластитовое поле имеет меридиональную ориентацию. Северное практически круглое, но имеет небольшую деформацию в С-СВ направлении. Под воздействием субширотного сжатия происходит ориентация ранее отложенных пород с вытягиванием их в меридиональном и субмеридиональном направлении. Об этом свидетельствуют и геоморфологические описания территории Южно-Сахалинского грязевого вулкана в работах (Веселов и др., 2012; Мельников, 2011; Сырык, 1970). Похожая картина наблюдается в данных квернометрии большинства вертикальных скважин севера и юга Сахалина (Али и др., 2002) с выносом соответствующей разрушению этого типа угловатой обвальской породы (Каменев, Богомолов, 2013). Только вместо распространения грязевого поля в меридиональном или субмеридиональном направлении, в сечении вертикальной скважины наблюдаются вывалы горной породы в северных и южных секторах. Под воздействием доминирующих горизонтальных напряжений, характерных для о. Сахалин, происходит так называемая оваллизация стенок скважины (Али и др., 2002; Дубиня, 2019). Таким образом, грязевой вулканизм Сахалина полностью отражает локальную и региональную геодинамическую обстановку реконструированную в том числе и с помощью других геофизических и геологических методов (Голозубов и др., 2012; Коновалов и др., 2014; Прытков и др., 2014; Сим и др. 2020; Татаурова, 2015; Polets, 2019). И может использоваться совместно с другими методами в качестве уточняющей информации.

Несомненно, можно возразить, что такой подход недостаточно точен при определении ориентации осей напряжений, но подобные определения в сейсмологии (по механизмам очагов) и в бурении (по квернометрии) также имеют большое количество недостатков и допущений (Ахмедов и др., 2015; Дубиня, 2019), при этом мы рассматриваем их как надежные и достоверные (и даже основные) источники информации о поле тектонических напряжений.

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

На основе геофизических, геологических и дистанционных (спутниковых) методов, про-

анализирован характер поля тектонических напряжений Южного Сахалина. Представленные методики изучения характера напряженно-деформированного состояния земной коры показывают удовлетворительное сходство в направлении ориентации осей главных напряжений. Для юга Сахалина наиболее характерно широтно-субширотное сжатие. На сегодняшний день, сейсмологические методы реконструкции напряжений (на основе механизмов очагов землетрясений) являются доминирующими в большинстве глобальных и региональных проектов, но достойной им альтернативой, а скорее дополнением, являются тектонофизические методы активно развивающиеся в серии недавних работ (Каменев, Маринин, 2023; Каменев и др., 2023; Bogomolov et al., 2020). Эти методы позволяют восполнить данные о характере поля напряжений в местах, где отсутствуют очаги землетрясений. В то же время показан и другой, альтернативный (дополнительный) метод реконструкции ориентации осей главных напряжений с помощью космоснимков грязевых вулканов, который весьма уверенно дополняет другие методики реконструкции тектонических напряжений. Расположение литокластитовых полей грязевых вулканов соответствует полю региональных тектонических напряжений, их взрывные поля вытянуты в субмеридиональном направлении. Сами литокластитовые поля имеют меридиональную и субмеридиональную ориентацию. Под воздействием субширотного горизонтального сжатия происходит ориентация ранее отложенных пород с вытягиванием их в меридиональном и субмеридиональном направлении. Таким образом, грязевые вулканы являются своеобразным индикатором регионального поля тектонических напряжений. Полученные результаты, по нашему мнению, могут использоваться не только для задач региональной (локальной) геодинамики, но и носить прикладной характер при разработке нефтегазовых, угольных и других месторождений. Для решения задач устойчивости горных массивов в местах интенсивного строительства инфраструктуры.

Автор благодарит сотрудников Института морской геологии и геофизики ДВО РАН В.В. Ершова за инициирование работ по исследованию грязевых вулканов Сахалина, ценные замечания и предложения и О.А. Жердеву за помощь в работе с графическим материалом.

Список литературы [References]

Али А. Х., Марти Ш., Еса Р. и др. Передовой метод гидравлического разрыва пласта с использованием геомеханического моделирования и механики пород — технически интегрированный подход // Нефтегазовое обозрение. Осень 2002.

- С. 75–83 [Ali A. H., Marty S., Esa R. et al. The advanced method of hydraulic fracturing using geomechanical modeling and rock mechanics is a technically integrated approach // Oilfield Review. Autumn 2002. P. 75–83].
- Аргентов В.В., Жигулев В.В., Мельников О.А., Патрикеев В.Н. Опыт применения малоуглубинной сейсмологии для выяснения строения Южно-Сахалинского газодогрязевого вулкана // Тихоокеанская геология. 2001. Т. 20. № 5. С. 3–11 [Argentov V.V., Zhigulyev V.V., Melnikov O.A., Patrikeyev V.N. The experience in application of small-depth seismic investigations for revealing of structure of the Yuzhno-Sakhalin gas-water-mud volcano // Russian Journal of Pacific Geology. 2001. V. 20. № 5. P. 3–11 (in Russian)].
- Астахов А.С., Сергеев К.Ф., Мельников О.А. и др. Динамика процессов дефлюидизации Центрально-Сахалинского глубинного разлома при сейсмической активизации (по результатам мониторинга Южно-Сахалинского грязевого вулкана в июле-августе 2001 // ДАН. 2002. Т. 386. № 2. С. 223–228 [Astakhov A.S., Sergeev K.F., Mel'nikov O.A. et al. Dynamics of defluidization of the deep-seated Central Sakhalin fault during seismic activation: Results of monitoring of the Southern Sakhalin Mud Volcano in July-August 2001 // Doklady Earth Sciences. 2002. V. 386. № 2. P. 223–228].
- 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 [Akhmedov M.B., Shlyunkin A.V., Lukyanov I.V., Rebetsky Yu.L. The field of modern stresses of the Earth's crust on the website of the IFZ RAS «Global Stress Map» // Modern tectonophysics. Methods and results: Materials of the IV youth tectonophysical school-seminar. Moscow: IFZ RAS, 2015. V. 1. P. 16–21 (in Russian)].
- Верхотуров А.А. Стратиграфическая привязка крупнообломочного материала из отложений Южно-Сахалинского грязевого вулкана // Геосистемы переходных зон. 2024. Т. 8. № 2. С. 104–113. <https://doi.org/10.30730/gtr.2024.8.2> [Verkhoturou A.A. Stratigraphic control of large detrital rocks of the Yuzhno-Sakhalinsk Mud Volcano // Geosystems of Transition Zones. 2024. V. 8. № 2. P. 104–113 (in Russian)].
- Веселов О.В., Волгин П.Ф., Лютая Л.М. Строение осадочного чехла пугачевского грязевулканического района (о. Сахалин) по данным геофизического моделирования // Тихоокеанская геология. 2012. Т. 31. № 6. С. 4–15 [Veselov O.V., Volgin P.F., Lyutaya L.M. Structure of the sedimentary cover of the Pugachevo mud volcano area in Sakhalin: Evidence from geophysical modeling // Russian Journal of Pacific Geology. 2012. V. 6. № 6. P. 413–422. <https://doi.org/10.1134/s1819714012060085>].
- Гладенков Ю.Б., Баженова О.К., Гречин В.И. и др. Кайнозой Сахалина и его нефтегазоносность / Под ред. Ю.Б. Гладенкова. М.: ГЕОС, 2002. 225 с. [Gladenkov Yu.B., Bazhenova V.I., Grechin L.S. et al. The Cenozoic Geology and the Oil and Gas Presence in Sakhalin. Moscow: GEOS, 2002. 225 p. (in Russian)].
- Голозубов В.В., Касаткин С.А., Гранник В.М., Нечаюк А.Е. Деформации позднемиоценовых и кайнозойских комплексов Западно-Сахалинского террейна // Геотектоника. 2012. № 5. С. 22–43 [Golozubov V.V., Kasatkin S.A., Grannik V.M., Nechayuk A.E. Deformation of the Upper Cretaceous and Cenozoic complexes of the West Sakhalin terrane // Geotectonics. 2012. V. 46. № 5. P. 333–351. <https://doi.org/10.1134/S0016852112050020>].
- Дубиня Н.В. Обзор скважинных методов изучения напряженного состояния верхних слоев земной коры // Физика Земли. 2019. № 2. С. 137–155. <https://doi.org/10.31857/S0002-333720192137-155> [Dubinya N.V. An overview of wellbore methods of investigating stress state of the upper layers of the earth's crust // Izvestiya. Physics of the solid Earth. 2019. V. 55. № 2. P. 311–326. <https://doi.org/10.1134/S1069351319020034>].
- Ершов В.В. Флюидодинамические процессы в грязевулканических структурах и их связь с региональной сейсмичностью (на примере о-ва Сахалин): Дисс. кан. физ.-мат. наук. Москва, 2013. 214 с. [Ershov V.V. Fluid dynamic processes in mud volcanic structures and their relationship with regional seismicity (on the example of Sakhalin Island): Dissertation candidate of Physical and Mathematical Sciences. Moscow, 2013. 214 p. (in Russian)].
- Жарков Р.В., Козлов Д.Н. Активность Пугачевских групп грязевых вулканов (о. Сахалин) в 2019–2021 гг. // Геодинамические процессы и природные катастрофы. Южно-Сахалинск: ИМГиГ ДВО РАН, 2021. 188 с. [Zharkov R.V., Kozlov D.N. The activity of the Pugachev group of mud volcanoes (Sakhalin Island) in 2019–2021 // Geodynamic processes and natural disasters. Yuzhno-Sakhalinsk: IMG FEB RAS, 2021. 188 p.].
- Каменев П.А., Маринин А.В. Реконструкция палеонапряжений Западного Сахалина по результатам тектонофизических исследований // Физико-технические проблемы разработки полезных ископаемых. 2023. №6. С. 52–65. <https://doi.org/10.15372/FTPRPI20230605> [Kamenev P.A., Marinin A.V. Reconstruction of Paleostresses in the West of Sakhalin from Tectonophysical Research Findings // Journal of Mining Science. 2023. V. 59. № 6. P. 919–929. <https://doi.org/10.1134/S1062739123060054>].
- Каменев П.А., Маринин А.В., Дегтярев В.А., Лукманов А.Р. Реконструкция тектонических напряжений Центрального Сахалина // Вестник КРАУНЦ. Серия: Науки о Земле. 2023. № 1. Вып. 57. С. 89–103. <https://doi.org/10.31431/1816-5524-2023-1-57-89-103> [Kamenev P.A., Marinin A.V., Degtyarev V.A., Lukmanov A.R. Reconstruction of Tectonic Stresses in Central Sakhalin // Russian Journal of Pacific Geology. 2023. V. 17S2. P. S154–S165. <https://doi.org/10.1134/S1819714023080079>].
- Каменев П.А., Богомолов Л.М. Комплексное исследование напряжений на основе данных каротажа и бурения на примере Сахалина // НТВ Каротажник. 2013. № 228. С. 13–23 [Kamenev P.A. Bogomolov L.M. Comprehensive stress study based on logging and drilling data on the example of Sakhalin // NTV Karotazhnic. 2013. № 228. P. 13–23 (in Russian)].

- Козырев А.А., Савченко С.Н.* Закономерности распределения тектонических напряжений в верхней части земной коры // *Физика Земли*. 2009. № 11. С. 34–43 [*Kozyrev A.A., Savchenko S.N.* Distribution relations of tectonical stresses in the upper part of the Earth's crust. *Izvestiya, Physics of the Solid Earth*. 2009. V. 45. № 11. P. 964–972. <https://doi.org/10.1134/S1069351309110044>].
- Коновалов А.В., Нагорных Т.В., Сафонов Д.А.* Современные исследования механизмов очагов землетрясений о. Сахалин. Владивосток: Дальнаука, 2014. 252 с. [*Konovalev A.V., Nagornyykh T.V., Safonov D.A.* 2014. Recent Study of Earthquake Source Mechanisms in Sakhalin. *Dal'nauka, Vladivostok*, 252 p. (in Russian)].
- Леонтьев А.В.* Анализ естественных напряжений по результатам измерений в рудниках на территории северной Евразии // *ФТПРПИ*. 2001. № 1. С. 31–40 [*Leontiev A.V.* Analysis of natural stresses based on measurement results in mines in northern Eurasia // *Journal of Mining Sciences*. 2001. №. 1. P. 31–40 (in Russian)].
- Мельников О.А.* Южно-Сахалинский газоводолитокластитовый («грязевой») вулкан – уникальный объект природы на Дальнем Востоке России. Южно-Сахалинск: ИМГиГ ДВО РАН, 2002. 48 с. [*Melnikov O.A.* Yuzhno-Sakhalinsk gas–lithoclastic («mud») volcano is a unique natural object in the Russian Far East. *Yuzhno-Sakhalinsk: IMGG FEB RAS*, 2002. 48 p (in Russian)].
- Мельников О.А.* Грязевой, или газоводолитокластитовый вулканизм Сахалина // *Вестник Сахалинского музея*. 2004. Т. 11. № 1. С. 334–347 [*Melnikov O.A.* Gryazevo, or gas–lithoclastic volcanism of Sakhalin // *Bulletin of the Sakhalin Museum*. 2004. V. 11. № 1. P. 334–347 (in Russian)].
- Мельников О.А.* О динамике и природе пугачевской группы газоводолитокластитовых («Грязевых») вулканов на сахалине по данным визуальных наблюдений и орогидрографии // *Вулканология и сейсмология* 2011. № 6. С. 47–59 [*Melnikov O.A.* On the dynamics and origin of. the Pugachevo group of gas–water–lithoclast («mud») volcanoes on Sakhalin Island: Visual observations and orohydrography // *Journal of Volcanology and Seismology*. 2011. V. 5. № 6. P. 409–420. <https://doi.org/10.1134/S0742046311060054>].
- Мельников О.А., Ершов В.В., Ким Чун Ун, Сен Рак Се.* О динамике грифонной деятельности газоводолитокластитовых (грязевых) вулканов и ее связи с естественной сейсмичностью на примере Южно-Сахалинского вулкана (о. Сахалин) // *Тихоокеанская геология*. 2008. Т. 27. № 5. С. 25–41 [*Melnikov O.A., Ershov V.V., Ung K.C., Se S.R.* Dynamics of the Gryphon Activity of Gas–Water Lithoclastic (Mud) Volcanoes and Their Relation to the Natural Seismicity as Exemplified by Yuzhno-Sakhalinsk Volcano (Sakhalin Island) // *Russian Journal of Pacific Geology*. 2008. V. 2. № 5. P. 397–411. <https://doi.org/10.1134/S1819714008050035>].
- Мишурицкий Д.В., Ершов В.В., Жарков Р.В. и др.* Геолого-геоморфологические и ландшафтно-экологические особенности Пугачевского грязевого вулкана как основа для организации и информационного сопровождения туристического маршрута (остров Сахалин) // *Геосистемы переходных зон*. 2018. Т. 2. № 4. С. 398–408. <https://doi.org/10.30730/2541-8912.2018.2.4.398-408> [*Mishurinskij D.V., Ershov V.V., Zharkov R.V. et al.* Geological-geomorphological and landscape-ecological features of the Pugachev Mud Volcano as a basis for organization and information support of the tourist route (Sakhalin Island). *Geosystems of Transition Zones*. 2018. V. 2. № 4. P. 398–408 (in Russian)].
- Никитенко О.А., Ершов В.В.* Гидрогеохимическая характеристика проявлений грязевого вулканизма на острове Сахалин // *Геосистемы переходных зон*. 2020. Т. 4. № 3. С. 321–350. <https://doi.org/10.30730/gtr.2020.4.3.321-335.336-350> [*Nikitenko O.A., Ershov V.V.* Hydrogeochemical characteristic of mud volcanism manifestations on Sakhalin Island // *Geosystems of Transition Zones*. 2020. V. 4. № 3. P. 321–350].
- Опорный разрез меловых отложений Сахалина (Найбинский разрез). Л.: Наука, 1987. 196 с.* [Reference section of Cretaceous deposits of Sakhalin (Naibinsky section). Leningrad: Nauka, 1987. 196 p. (in Russian)].
- Прытков А.С., Василенко Н.Ф., Ершов В.В.* Моделирование извержения Южно-Сахалинского грязевого вулкана в 2011 г. По данным GPS наблюдений // *Тихоокеанская геология*. 2014. Т. 33. № 3. С. 79–87 [*Prytkov A.S., Vasilenko N.F., Ershov V.V.* Simulation of the 2011 South Sakhalin mud volcano eruption based on the GPS data // *Russian Journal of Pacific Geology*. 2014. T. 8. № 3. С. 224–231. <https://doi.org/10.1134/S1819714014030075>].
- Сайто Ф.* Грязевые вулканы близ железной дороги Тохара-Маока на Южном Сахалине. Новоалександровск: ИМГиГ ДВО РАН, 1959. 9 с. [*Saito F.* Mud volcanoes near the Toyohara-Maoka railway on Southern Sakhalin. Novoalexandrovsk: IMGG FEB RAS, 1959. 9 p (in Russian)].
- 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. <https://doi.org/10.5800/GT-2017-8-1-0237> [*Sim L.A., Bogomolov L.M., Bryantseva G.V., Savvichev P.A.* Neotectonics and tectonic stresses of the Sakhalin Island // *Geodynamics & Tectonophysics*. 2017. V. 8. № 1. P. 181–202 (in Russian)].
- Сим Л.А., Каменев П.А., Богомолов Л.М.* Новые данные о новейшем напряженном состоянии земной коры острова Сахалин (по структурно-геоморфологическим индикаторам тектонических напряжений) // *Геосистемы переходных зон*. 2020. Т. 4. № 4. С. 372–383. <https://doi.org/10.30730/gtr.2020.4.4.372-383> [*Sim L.A., Kamenev P.A., Bogomolov L.M.* New data on the latest stress state of the earth's crust on Sakhalin Island (based on structural and geomorphological indicators of tectonic stress) // *Geosystems of Transition Zones*. 2020. V. 4. № 4. P. 372–383 (in Russian)].
- Сырык И.М.* Нефтегазоносность восточных склонов Западно-Сахалинских гор. М.: Наука, 1968. 248 с. [*Siryk I.M.* Oil and gas potential of the eastern slopes

- of the Western Sakhalin mountains. Moscow: Nauka, 1968. 248 p (in Russian).
- Сирьк И.М.* Грязевые вулканы. Геология СССР. М.: Недра, 1970. Т. 33. № 7. С. 355–368 [*Siryk I.M.* Mud volcanoes. Geology of the USSR. Moscow: Nedra, 1970. V. 33. № 7. P. 355–368 (in Russian)].
- Смирнов Н., Татаурова А., Мальцев А., Глазырина А.* Подтвержденный опыт успешной эксплуатации многоствольных скважин открытым забоем в слабоконсолидированных коллекторах для повышения маржинальности разработки месторождения // Нефтепромысловое дело. 2024. Т. 661. № 1. С. 20–28 [*Smirnov N., Tataurova A., Maltsev A., Glazyrina A.* Proven experience of successful operation of multi-lateral wells by an open-hole method in weakly consolidated reservoirs to increase the fields development marginality // Oilfield engineering. 2024. V. 661. № 1. P. 20–28 (in Russian)].
- Татаурова А.А.* Поля напряжений и деформаций по данным механизмов коровых землетрясений о. Сахалин // Вестник КРАУНЦ. Науки о Земле. 2015. № 3. Вып. 27. С. 92–101 [*Tataurova A.A.* Stress and strain fields based on data on crustal earthquake mechanisms in Sakhalin Island. Vestnik KRAUNTS. Nauki o Zemle. 2015. № 3(27). P. 92–101 (in Russian)].
- Тверитинова Т.Ю., Белобородов Д.Е., Лиходеев Д.В.* Грязевые вулканы в структуре Керченского полуострова // Электронный научно-образовательный журнал Динамическая геология. 2020. № 1. С. 38–54 [*Tveritina T.Yu., Beloborodov D.E., Likhodeev D.V.* Mud volcanoes in the structure of the Kerch Peninsula // The electronic scientific and educational journal Dynamic Geology. 2020. № 1. P. 38–54 (in Russian)].
- Тверитинова Т.Ю., Белобородов Д.Е.* Грязевые вулканы в неотектонической структуре Таманского полуострова // Электронный научно-образовательный журнал Динамическая геология. 2020. № 2. С. 157–186 [*Tveritina T.Yu., Beloborodov D.E.* Mud volcanoes in the neotectonic structure of the Taman Peninsula // Electronic scientific and educational journal Dynamic Geology. 2020. № 2. P. 157–186 (in Russian)].
- Уэда М.* Грязевой вулкан Магунтан / Ред. М.М. Шукевич. Новоалександровск: Фонды ИМГиГ ДВО РАН. 1948. 31 с. [*Ueda M.* Mud volcano Maguntan / Ed. M.M. Shukevich. Novoalexandrovsk: Funds of IMGG FEB RAS. 1948. 31 p. (in Russian)].
- Шпеталенко Л.П., Чмыхалова Т.П., Чайникова М.В.* Атлас тектонических структур угольных месторождений Сахалина. Южно-Сахалинск, 1976. 93 с. [*Shpetalenko L.P., Chmikalova T.P., Chaunikova M.V.* Atlas of tectonic structures of Sakhalin coal deposits. Yuzhno-Sakhalinsk, 1976. 93 p. (in Russian)].
- Якубов А.А., Григорьянц Б.В., Алиев Ад.А. и др.* Грязевой вулканизм Советского Союза и его связь с нефтегазоносностью. Баку: Элм, 1980. 167 с. [*Yakubov A.A., Grigoryants B.V., Aliev A.A. et al.* Mud volcanism of the Soviet Union and its connection with oil and gas potential. Baku: Elm, 1980. 167 p. (in Russian)].
- Abdideh M., Dastyaft F.* Stress field analysis and its effect on selection of optimal well trajectory in directional drilling (case study: southwest of Iran) // Journal of Petroleum Exploration and Production Technology. 2021. <https://doi.org/10.1007/s13202-021-01337-5>
- Bogomolov L.M., Sim L.A., Kamenev P.A.* Neotectonics and Stressed State Patterns of the Sakhalin Island // Intech Open. Engineering Geology. 2020. <https://doi.org/10.5772/intechopen.93522>
- Bonini M.* Elliptical mud volcano caldera as stress indicator in an active compressional setting (Nirano, Pedemontane margin, northern Italy) // Geology. 2008. V. 36. № 2. P. 131–134. <https://doi.org/10.1130/G24158A.1>
- Bonini M.* Mud volcanoes: Indicators of stress orientation and tectonic controls // Earth-Science Reviews. 2012. V. 115. № 3. P. 121–152. <https://doi.org/10.1016/j.earscirev.2012.09.002>
- Dubinya N., Tikhotsky S., Bayuk I. et al.* Prediction of Physical-Mechanical Properties and In-Situ Stress State of Hydrocarbon Reservoirs from Experimental Data and Theoretical Modeling // SPE Russian Petroleum Technology Conference. 2017. SPE-187823-MS. <https://doi.org/10.2118/187823-MS>
- Fjær E., Holt R.M., Horsrud P. et al.* Petroleum related rock mechanics. 2nd ed. 2008. 491 p.
- Heidbach O., Rajabi M., Cui X. et al.* The World Stress Map database release 2016: Crustal stress pattern across scales // Tectonophysics. 2018. V. 744. P. 484–498. <https://doi.org/10.1016/j.tecto.2018.07.007>
- Hui G., Li S., Wang P. et al.* Neotectonic implications and regional stress field constraints on mud volcanoes in offshore southwestern Taiwan. Marine Geology. 2018. V. 403. P. 109–122. <https://doi.org/10.1016/j.margeo.2018.05.002>
- Kruszewski M., Klee G., Niederhuber T., Heidbach O.* In situ stress database of the greater Ruhr region (Germany) derived from hydrofracturing tests and borehole logs // Earth Syst. Sci. Data. 2022. V. 14. P. 5367–5385. <https://doi.org/10.5194/essd-14-5367-2022>
- Mazzini A., Giuseppe E.* Mud volcanism: an updated review // Earth-science reviews. 2017. V. 168. P. 81–112. <https://doi.org/10.1016/j.earscirev.2017.03.001>
- Nakamura K., Jacob K.H., Davies J.N.* Volcanoes as possible indicators of tectonic stress orientation – Aleutians and Alaska // Pure and Applied Geophysics. 1977. V. 115. P. 87–112. <https://doi.org/10.1007/BF01637099>
- Paulsen T.S., Wilson T.J.* Elongate summit calderas as possible Neogene paleostress indicators in Antarctica // USGS Open-File Report. 2007. V. 1047. Short Research Paper 072. 6 p. <https://doi.org/10.3133/of2007-1047.srp072>
- Polets A.Yu.* The stress state of the Sakhalin Island and adjacent territories // IOP Conf. Series: Earth and Environmental Science. 2019. V. 324. № 012010. <https://doi.org/10.1088/1755-1315/324/1/012010>
- Viola G., Andreoli M., Ben-Avraham Z. et al.* Offshore mud volcanoes and onland faulting in southwestern Africa: neotectonic implications and constraints on the regional stress field // Earth and Planetary Science Letters. 2005. V. 231. № 1–2. P. 147–160. <https://doi.org/10.1016/j.epsl.2004.12.001>
- Zoback M.D.* Reservoir Geomechanics. Cambridge: Cambridge University Press. 2007. 505 p.

РОЛЬ РЕГИОНАЛЬНЫХ ТЕКТОНИЧЕСКИХ НАПРЯЖЕНИЙ
**THE ROLE OF REGIONAL TECTONIC STRESSES IN MUD VOLCANISM
IN SOUTHERN SAKHALIN**

P.A. Kamenev

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

Received June 08, 2024; revised September 03, 2024; accepted September 25, 2024

The article is devoted to the study of the tectonic stress field of Southern Sakhalin on the basis of seismological, geological, tectonophysical, GPS and remote (satellite) methods. The most characteristic type of stress state for the South of Sakhalin is latitudinal — sublatitudinal horizontal compression. The field forming the morphology of the Pugachev and Yuzhno-Sakhalinsk mud volcanoes, as well as the shape of their lithoclastite fields, fully corresponds to the nature of this state, which is confirmed by the analysis of satellite images. The images were used to supplement the results of previous researchers on the study of the directions of the gryphon bands and to measure deformation of volcano lithoclastite fields. The Pugachev volcano lithoclastite fields bend strikes 25° , and that of the Yuzhno-Sakhalinsk mud volcano strikes 30° , which well corresponds to the regional tectonic stress field. The expediency of using remote (satellite) methods as an supplement to geological and geophysical methods, in particular borehole caliper, is shown.

Keywords: mud volcanism, tectonic stresses, borehole caliper, earthquake focal mechanisms.