

УДК 551(571.64)

**ДИНАМИКА ПРОЦЕССОВ ДЕФЛЮИДИЗАЦИИ
ЦЕНТРАЛЬНО-САХАЛИНСКОГО ГЛУБИННОГО РАЗЛОМА
ПРИ СЕЙСМИЧЕСКОЙ АКТИВИЗАЦИИ
(ПО РЕЗУЛЬТАТАМ МОНИТОРИНГА ЮЖНО-САХАЛИНСКОГО
ГРЯЗЕВОГО ВУЛКАНА В ИЮЛЕ–АВГУСТЕ 2001 г.)**

© 2002 г. А. С. Астахов, член-корреспондент РАН К. Ф. Сергеев, О. А. Мельников,
А. В. Присяжнюк, Р. Б. Шакиров, П. Ф. Бровко, В. И. Киселев

Поступило 06.05.2001 г.

Процессы дефлюидизации наиболее интенсивно проявлены на активных континентальных окраинах, где существует система глубинных разломов, по которым возможна поставка жидких и газообразных флюидов в океан или атмосферу из осадочных бассейнов, находящихся на различных стадиях постседиментационного преобразования осадочных пород, или из более глубоких слоев земной коры. С этими процессами связывается формирование многих гидротермальных, гидротермально-осадочных и осадочных месторождений полезных ископаемых, образование и разрушение залежей углеводородов. В последние годы интерес к изучению процессов дефлюидизации земной коры обусловлен и исследованиями баланса парниковых газов в атмосфере, что не может быть выполнено без учета эндогенной поставки метана и углекислого газа.

Состав глубинных флюидов и интенсивность их поставки исследованы недостаточно, особенно для периодов активизации эндогенных процессов. Судя по наиболее характерным и изученным внешним проявлениям процессов дефлюидизации – грязевым вулканам, в периоды интенсивных извержений выбрасывается основная масса газообразных, жидких и твердых продуктов, по составу резко отличающихся от поставляемых при обычных условиях [9, 10, 15].

В связи с этим в июле–августе 2001 г. проведен мониторинг деятельности Южно-Сахалинского грязевого вулкана, находящегося в 20 км к северо-западу от города Южно-Сахалинск (рис. 1). Он приурочен к Центрально-Сахалинскому глубинному разлому (Тынь-Поронайский взбросонадвиг) – самой крупной структурно-тектонической единице о. Сахалин, разделяющей его восточную и западную структурно-формационные зоны. С разломом ассоциируют среднемиоценовые вулканогенные интрузивные комплексы основных пород, другие грязевые вулканы, минеральные источники, проявления эпитеpmальных руд и газа [5, 8]. К ней приурочены эпицентры коровых землетрясений интенсивностью 6–7 баллов и более [8, 12, 14].

Ранее была выявлена приуроченность извержений грязевых вулканов о. Сахалин к периодам сейсмической активизации в связи с землетрясениями в пределах контролирующих их разломов, либо при прохождении гидравлической волны сжатия от удаленных тектонических дислокаций [8, 10, 12]. На основании состава флюидов и твердых продуктов извержений, а также теоретических расчетов считается, что подводящие каналы Южно-Сахалинского грязевого вулкана заложены на глубине 2–3 км [3, 15], хотя нельзя исключить более глубокие источники флюидов. Предполагается, что многие характеристики этого вулкана указывают на максимальное влияние глубинных флюидов в формировании продуктов извержений по сравнению с другими грязевыми вулканами о. Сахалин и типичной области грязевого вулканизма Крымско-Кавказского региона [9]. Некоторые исследователи [7, 9], отмечая очень большую минерализацию сопочных вод, аномальное соотношение в них Ca/Mg, превышение содержаний углекислого газа над метаном, аномальный изотопный состав гелия, предполагают существенный привнос вулканических и даже мантийных флюидов, поступающих по глубинному разлому. По некоторым имеющимся

*Тихоокеанский океанологический институт
им. В.И. Ильичева Дальневосточного отделения
Российской Академии наук, Владивосток
Институт морской геологии и геофизики
Дальневосточного отделения
Российской Академии наук, Южно-Сахалинск
Дальневосточный геологический институт
Дальневосточного отделения
Российской Академии наук, Владивосток
Дальневосточный государственный университет,
Владивосток*

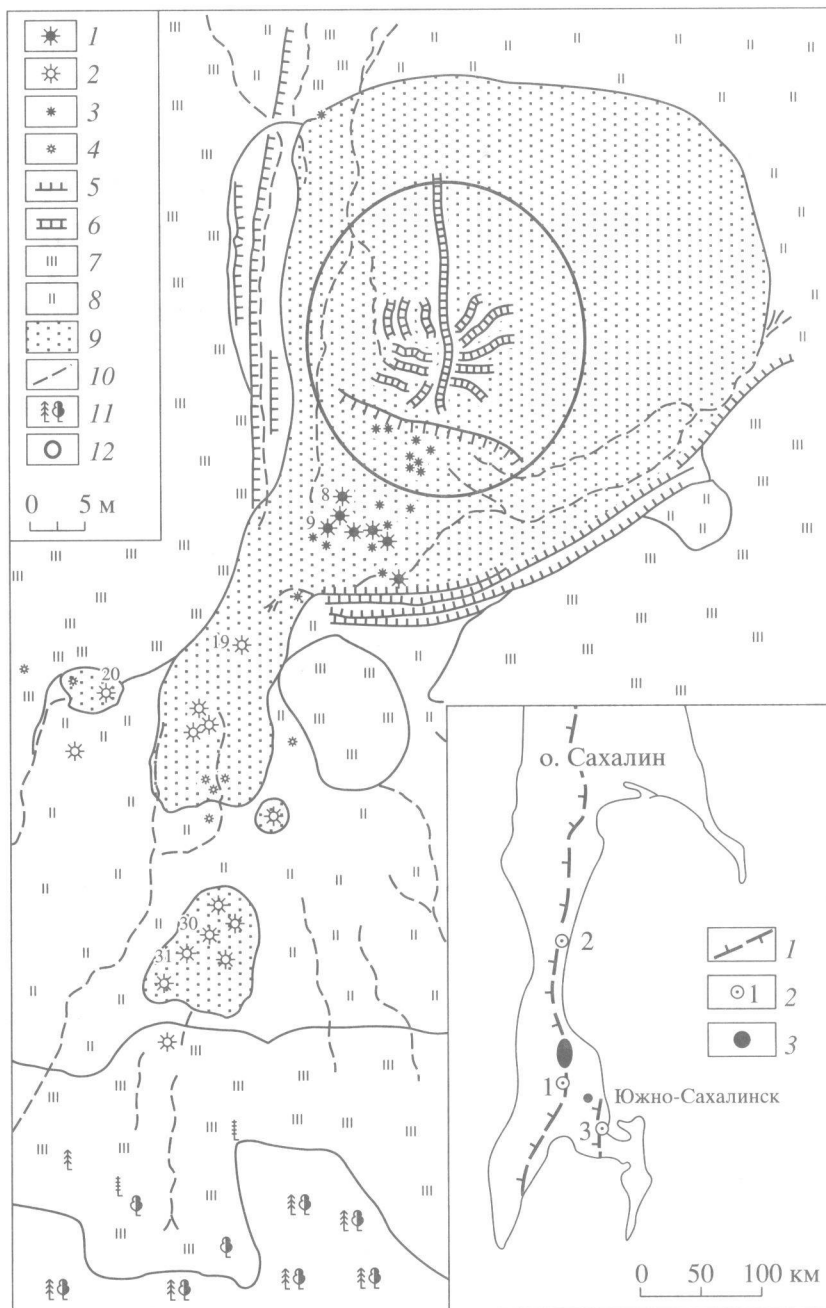


Рис. 1. Привершинная часть Южно-Сахалинского грязевого вулкана в июле 2001 г. 1, 2 – основные грифоны: 1 – высокие преимущественно газогрязевые, 2 – низкие пологие преимущественно газоводные; 3, 4 – небольшие или эпизодически действовавшие грифоны: 3 – преимущественно газоводогрязевые, 4 – преимущественно газоводные; 5 – свежие уступы проседания; 6 – трещины на грязевом поле; 7, 8 – участки, покрытые травянистой растительностью: 7 – густой, 8 – редкой; 9 – лишенная растительности поверхность грязевых потоков (преимущественно извержения 1996 г.); 10 – оси ложбин временных водотоков; 11 – участки, покрытые лесом; 12 – границы поднятия, образовавшегося в августе 2001 г. На врезке: расположение Центрально-Сахалинского глубинного разлома и грязевых вулканов южной части о. Сахалин. 1 – основные разломы; 2 – газоводогрязевые вулканы: 1 – Южно-Сахалинский, 2 – Пугачевский, 3 – Лесновский; 3 – зона локализации эпицентров землетрясений конца июля–сентября 2001 г.

классификациям [4] подобные газовые источники относятся к гидротермальным смешанного вулканогенно-осадочного типа. В периоды активных извержений были отмечены увеличение тем-

пературы водогрязевой смеси до 20–32°C, минерализации сопочных вод до 25‰ [2, 10].

В период мониторинга имела место сейсмическая активизация в зоне Центрально-Сахалин-

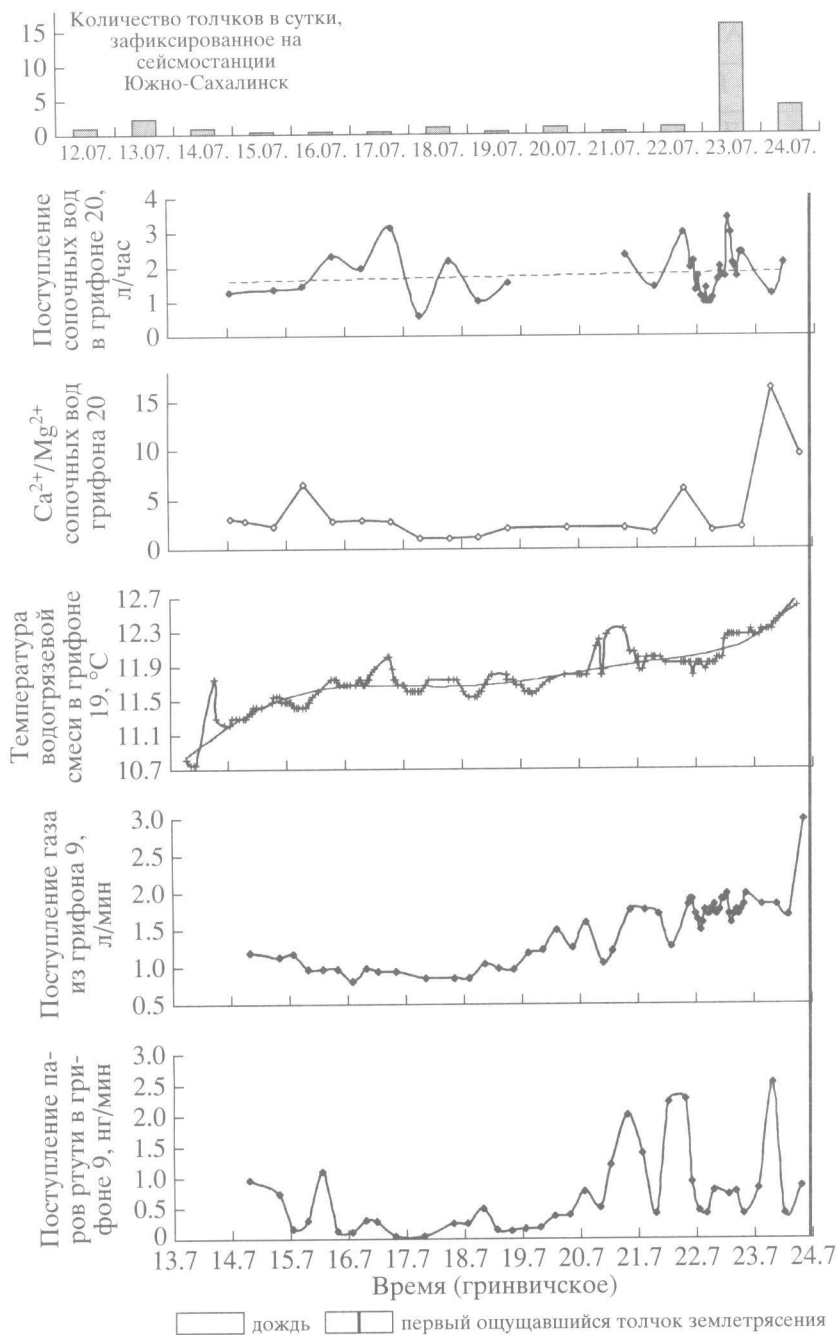


Рис. 2. Изменение некоторых параметров деятельности Южно-Сахалинского грязевого вулкана в июле 2001 г. в период со спокойным сейсмическим режимом и при первой серии сейсмических толчков 23.07.2001 г.

ского глубинного разлома. С конца июля по середину сентября были отмечены несколько серий сейсмических толчков [6] с интенсивностью от 5–6 до 7 баллов и гипоцентрами, приуроченными к относительно небольшому участку в 20 км к северу от Южно-Сахалинского грязевого вулкана (рис. 1). Наиболее детальный мониторинг проводился с 12 по 23 июля*, когда ежедневно фикси-

ровались характер деятельности каждого грифона и изменения рельефа грифонного поля, по некоторым грифонам с периодичностью от 1 до 12 ч измерялись температура водогрязевой смеси, дебит газовых и водных источников, отбирались пробы сопочных газов, воды и брекчии для последующего анализа в полевой или стационарной лабораториях.

Постоянный отбор проб спонтанных газов проводился из высокого грифона 9 (рис. 1). Из

* Все даты и числа приведены по средневропейскому (гринвичскому) времени.

Таблица 1. Средние содержания химических элементов в сопочных водах Южно-Сахалинского грязевого вулкана (мкг/мл) по результатам АЕС–ИСП определений

№ грифонов	Число проб	B	Ba	Bi	Ge	Fe	Mo	Ni	Zn	Sn	Sr	Te
До сейсмической активизации (16–22 июля)												
9, 19, 30	4	38	0.13	0.016	0.02	0.221	0.062	0.020	0.224	0.075	2.34	0.008
При сейсмической активизации (17 августа)												
19, 20, 31	3	216	4.64	<0.001	0.02	<0.003	0.046	0.031	0.048	0.061	1.67	0.009

Примечание. Ниже предела определения метода были содержания: Pb (<0.015), Sb (<0.01), Ag (<0.002), Cu (<0.0015), Cd, Sc, La, Yb (<0.001), Mn (<0.0001).

этого же грифона и грифона 8 проводился отбор проб брекчии. Постоянные гидрохимические измерения проводились на грифоне 20. Эти исследования продолжались до начала сейсмической активизации 23 июля. За указанные сутки сейсмостанцией Южно-Сахалинск были зафиксированы 16 толчков (рис. 2). Один из них ощущался как землетрясение 2–3 балла в пос. Синегорск в нескольких километрах от вулкана. Существенных изменений в пределах самого вулкана в это время зафиксировано не было. При полной обработке результатов мониторинга выявились характерные вариации некоторых параметров в период активизации или перед ней (рис. 2), которые можно считать следствием возникновения тектонических напряжений в земной коре, предшествующих землетрясениям, или самих землетрясений.

Следующее обследование грязевого вулкана выполнено 17 августа после еще нескольких серий сейсмических толчков, некоторые из которых ощущались в пос. Синегорск как землетрясение до 5–6 баллов. При обследовании обнаружены существенные изменения рельефа грифонного поля. На месте, где под слоем высохшей брекчии находился основной подводящий канал последнего 1996 г. извержения [1, 11], а в июле 2001 г. была зафиксирована серия радиальных трещин (рис. 1), образовался купол высотой около 2 м и около 30 м диаметром. Поверхность его сложена крупными глыбами относительно сухой грязевулканической брекчии, образованными сетью радиальных и концентрических трещин при вздымании. Никаких источников в пределах этого поля не выявлено. На остальной части грифонного поля характер эксплозивной деятельности существенно изменился. Большинство грифонов начало действовать более активно, некоторые прекратили свою деятельность, появились новые грифоны.

Сопоставление состава продуктов извержений при опробовании 17 августа и за период, предшествующий сейсмической активизации, показало значительное увеличение поступления газов, паров ртути и повышение температуры водогазовой смеси (рис. 3). Кроме того, появились некоторые новые признаки, вариации которых могут

рассматриваться как следствие изменений флюидопроницаемости в зоне Центрально-Сахалинского разлома при сейсмической активизации. Наиболее интересны данные по изменениям химического состава сопочной брекчии (рис. 3) и микроэлементного состава сопочных вод (табл. 1). В то же время скорость поступления последних почти не менялась. При очень резкой суточной изменчивости поступления вод выявлен очень слабый положительный тренд к началу активизации (см. рис. 2). Отмечаются отчетливое увеличение и суточные вариации температуры водогазовой смеси в период активизации. При интерпретации этих данных необходимо учитывать влияние гидрогеологической зоны свободного водообмена, через которую проходят, частично разбавляясь и охлаждаясь, глубинные воды. Температура слабоминерализованного водного источника из этой зоны, расположенного в 300 м от грифонного поля, в период наблюдений была постоянной 5–6°C. Кроме того, с поверхности происходило нагревание, в том числе и при разбавлении более теплыми дождевыми водами. Оно проявилось в увеличении температуры сопочных вод 20 июля (см. рис. 2), снижении рН (до 7.9 при обычных 8.2–8.9) и перманганатной окисляемости (до 7.6 при обычных 12–17).

Изменение микроэлементного состава сопочных вод следует рассматривать с учетом указанных особенностей их формирования и изменения физико-химических параметров в верхней части флюидоподводящих каналов. Увеличение эндогенной поставки с глубинными водами выявлено только для бария, бора и кальция, содержание которых в период активизации увеличивается как в сопочных водах (см. табл. 1, рис. 2), так и в сопочной брекчии (см. рис. 3). Вариации содержания других элементов могут зависеть от направленности физико-химических процессов в верхней части подводящих каналов под действием изменяющихся температуры, давления, содержания газов, степени разбавления атмосферными водами. Характерным примером является железо, содержание которого в сопочных водах в период активизации резко снизилось (см. табл. 1), но увеличилось содержание в сопочной брекчии (см. рис. 3).

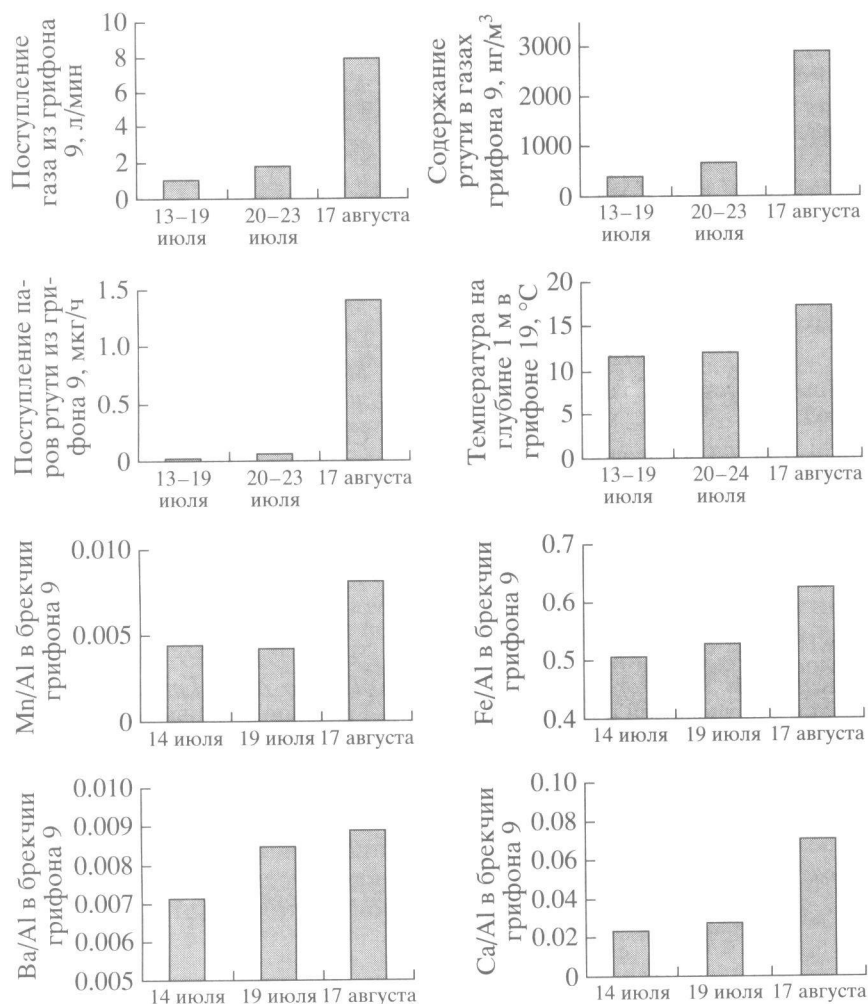


Рис. 3. Вариации активности и состава продуктов извержений Южно-Сахалинского грязевого вулкана на примере отдельных грифонов в периоды со спокойным сейсмическим режимом (июль) и при сейсмической активизации на Центрально-Сахалинском разломе с конца июля по середину сентября (измерения 17 августа).

Основной состав спонтанных газов за период наблюдений практически не изменился: перед землетрясением содержание CO_2 варьировало в пределах 69.2–83.9%, CH_4 12.4–28.4%; при измерениях 17 августа они составили соответственно 71.0 и 23.4%. Содержание тяжелых углеводородов (до пентана) как до землетрясения, так и после него во всех пробах не превышало десятых долей процента. Изотопный состав углерода углекислого газа ($\delta^{13}\text{C}$) перед активизацией был достаточно стабилен: от -2.8 до -2.7‰ PDB.

По многим характеристикам отмечаются циклические изменения с периодом, близким суточному. Наиболее проявлены они в темпах поступления сопочных вод, паров ртути и газов в целом, вариациях температуры и определяются периодическим изменением флюидопроницаемости зоны разлома, имеющих, вероятно, приливную природу. Максимальные суточные вариации указан-

ных параметров отмечались с 18 по 23 июля (рис. 2), в период максимальных сизигийных морских приливов на ближайших побережьях Охотского моря.

Проведенные исследования позволили впервые количественно охарактеризовать изменения эксплозивной деятельности грязевого вулкана в условиях сейсмической активизации. При этом установлены резкое увеличение поступления газов, а также, хотя и значительно меньше, сопочных вод, увеличение температуры продуктов извержений и изменение их состава. Наиболее характерными элементами флюидов при активизации явились CO_2 , CH_4 , Hg, Ba, B, Ca. Помимо тектонических процессов изменение флюидопроницаемости зоны Центрально-Сахалинского глубинного разлома определяется и приливными явлениями в земной коре. Об этом свидетельствуют суточные вариации поставки флюидов, их температуры и состава.

Исследования выполнены при финансовой поддержке Центра “Интеграция” (экспедиционный грант Е0252) и РФФИ (грант 01–05–64904а). Часть аналитических исследований выполнена при поддержке ФЦП “Мировой океан” (проект 4.4.3).

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. *Аргентов В.В., Жигулев В.В., Мельников О.А. и др.* // Тихоокеан. геология. 2001. Т. 20. № 5. С. 3–11.
2. Геология СССР. Том 33. Остров Сахалин. М.: Недра, 1970. С. 355–367.
3. *Горкун В.Н., Сырык И.М.* // Геология и геофизика. 1967. № 2. С. 30–42.
4. *Егоров Ю.О.* Геологическое строение и газонасыщенность морских осадков современных вулканических областей. Владивосток: Дальнаука, 2001. 137 с.
5. *Занюков В.Н.* // ДАН. 1971. Т. 196. № 4. С. 913–916.
6. *Иващенко А.И., Ким Чун Ун, Поплавская Л.Н. и др.* В кн.: Динамика очаговых зон и прогнозирование сильных землетрясений северо-запада Тихого океана. Южно-Сахалинск: ИМГиГ ДВО РАН, 2001. С. 161–193.
7. *Каменский И.Л., Прасолов Э.М., Тихомиров В.В.* // Геохимия. 1974. № 8. С. 1226–1231.
8. *Косыгин Ю.А., Сергеев К.Ф., Сапрыгин С.М. и др.* // ДАН. 1980. Т. 254. № 3. С. 707–712.
9. *Лаврушин В.Ю., Поляк Б.Г., Прасолов Э.М. и др.* // Литология и полез. ископаемые. 1996. № 6. С. 625–647.
10. *Мельников О.А., Ильев А.Я.* // Тихоокеан. геология. 1989. Т. 8. № 3. С. 42–49.
11. *Мельников О.А., Сабиров Р.Н.* // Тихоокеан. геология. 1999. Т. 18. № 3. С. 37–46.
12. *Сапрыгин С.М.* В кн.: Проблемы геодинамики и прогноза землетрясений. I Российско-Японский семинар. Хабаровск, 2001. С. 200–204.
13. *Сырык И. М.* Нефтегазоносность восточных склонов Западно-Сахалинских гор. М.: Наука, 1968. 247 с.
14. *Соловьев С.Л., Оскорбин Л.С., Ферчев М.Д.* Землетрясения на Сахалине. М.: Наука, 1967. 179 с.
15. *Якубов А.А., Григорьянц Б.В., Алиев А.Д. и др.* Грязевой вулканизм Советского Союза и его связь с нефтегазоносностью. Баку: Элм, 1980. 165 с.