

УДК 550.341.5

ИССЛЕДОВАНИЯ ИЗОТОПНОГО СОСТАВА ВОДЫ
В МУТНОВСКОМ ГЕОТЕРМАЛЬНОМ РАЙОНЕ (ВУЛКАН,
МЕСТОРОЖДЕНИЕ, НИЖНЕ-ЖИРОВСКОЙ ИСТОЧНИК, РОДНИКОВЫЙ),
ВЛИЯНИЕ ФАЗОВОГО ФРАКЦИОНИРОВАНИЯ

А.Ю. Поляков, А.В. Кирюхин, П.О. Воронин, О.О. Усачева

*Институт вулканологии и сейсмологии ДВО РАН,
Петропавловск-Камчатский, 683006; e-mail: pol@kscnet.ru*

Многолетние наблюдения за изотопным составом холодных и термоминеральных вод в Мутновском геотермальном районе, с учетом изотопного фракционирования, подтверждают вывод, что наиболее вероятной областью водного питания Мутновского месторождения (скважин), Нижне-Жировских и Вилючинских источников является вода ледников Мутновского вулкана.

Введение

Для определения источника водного питания источников и скважин Мутновского геотермального района, а так же в целях выдачи рекомендаций для наиболее оптимального использования продуктивных скважин Мутновской и Верхне-Мутновской ГеоЭС, с 90-х годов 20 века, нами регулярно проводится отбор проб воды для измерения изотопного состава. С февраля 2014 г. изотопный анализ вод (δD , δO^{18}) производится в лаборатории тепломассопереноса ИВиС ДВО РАН, на анализатор изотопного состава воды компании Los Gatos Research США, (<http://www.lgrinc.com/analyzers/overview.php?prodid=16&type=isotope>) - IWA-35EP.

Результаты измерений полученные из холодных источников и водотоков, не требуют дальнейшей обработки, в случае же отбора проб из пароводяных скважин и кипящих источников, необходим пересчет на изотопное фракционирование, для чего необходимо учитывать: 1. температуру и давление при котором происходит разделение жидкости на водную и паровую составляющие (давление сепарации); 2. Исходную энтальпию воды.

Такие пересчеты уже выполнялись, но по упрощенным формулам [2,8,9,12]. В настоящее время работе используются более точные зависимости.

Методика пересчета на изотопное фракционирование

Для расчета изотопного состава исходной воды в условиях геотермального резервуара, мы воспользовались формулами Арнасона [1].

Для: O^{18} :

$$\delta_{0(O^{18})} = \delta_{L(O^{18})} \left(1 - \left(1 - \frac{1}{\alpha_{(O^{18})}} \right) \right) \eta - \left(1 - \frac{1}{\alpha_{(O^{18})}} \right) \eta \cdot 1000 \quad (1)$$

Для D:

$$\delta_{0(D)} = \delta_{L(D)} \left(1 - \left(1 - \frac{1}{\alpha_{(D)}} \right) \right) \eta - \left(1 - \frac{1}{\alpha_{(D)}} \right) \eta \cdot 100 \quad (2)$$

Где:

$\delta_{0(O18)}$ и $\delta_{0(D)}$ – пересчитанные значения D и O¹⁸, в исходной воде,

$\delta_{L(O18)}$ и $\delta_{L(D)}$ – измеренные значения D и O¹⁸ в сепарате воды,

η - доля пара образовавшегося из перегретой воды при давлении сепарации,

$\alpha_{(O18)}$ и $\alpha_{(D)}$ – константы равновесия, между водой и паром, при соответствующей температуре сепарации, для D и O¹⁸.

Доля пара образовавшегося из перегретой воды – η , при соответствующей температуре и давлении сепарации, вычисляется по формуле (3):

$$\eta = \frac{h_0 - h_w}{h_s - h_w} \quad (3)$$

Где:

h_0 - энтальпия скважины или источника, из которых осуществлялся отбор пробы,

h_w - энтальпия воды при температуре и давлении сепарации,

h_s - энтальпия пара при температуре и давлении сепарации.

Значения энтальпии скважин h_0 , определялась при опытно-эксплуатационных выпусках в 1995-1999г. и в процессе эксплуатации Мутновского геотермального месторождения начиная с 2000 г, значение энтальпии Нижне-Жировского источника, взято из [6], h_w и h_s взяты из таблиц программного кода программы TOUGH2 [11].

Константы равновесия $\alpha_{(O18)}$ и $\alpha_{(D)}$, для требуемой температуры, температурного диапазона 100-300 °С, вычислялись при помощи полиномиальной аппроксимации табличных значений из [1] (4,5)

$$\alpha_{(O18)} = 1.008935664 - 0.000043002331 \times t + 0.00000005477855478 \times t^2 \quad (4)$$

$$\alpha_{(D)} = 1.063581119 - 0.0004410780886 \times t + 0.0000007100815851 \times t^2 \quad (5)$$

Формулу, для пересчета результата изотопных измерений проб конденсата пара (D и O¹⁸), мы вывели самостоятельно, так же базируясь на [1] (6,7).

$$\delta_{0(O18)} = \delta_{L(O18)} (\alpha_{(O18)} (1 - \eta) + \eta) + (1 - \eta) \cdot 1000 \cdot (\alpha_{(O18)} - 1) \quad (6)$$

$$\delta_{0(D)} = \delta_{L(D)} (\alpha_{(D)} (1 - \eta) + \eta) + (1 - \eta) \cdot 1000 \cdot (\alpha_{(D)} - 1) \quad (7)$$

Где:

$\delta_{0(O18)}$ и $\delta_{0(D)}$ – пересчитанные значения D и O¹⁸, для исходной воды,

$\delta_{L(O18)}$ и $\delta_{L(D)}$ – измеренные значения D и O¹⁸ в конденсате пара.

Все остальные обозначения в формулах аналогичны используемым выше.

Полученные результаты

В таблице, приведены все исходные значения, использовавшиеся для вычисления поправки на изотопное фракционирования, для Мутновских скважин и Верхне-Жировского источника и результаты пересчета измерений D и O¹⁸, для сепарата воды. Для скважин 26 и 016, нами оставлены первоначальные значения, данные скважины выводят практически чистый пар из резервуара, и фракционирования в самой скважине не происходит (хотя изотопное оно могло происходить в условиях резервуара до поступления теплоносителя в скважину).

На рис 1. приведены обобщенные данные по изотопному составу:

а) исходного геотермального теплоносителя вскрываемого скважинами Мутновского месторождения и Нижне-Жировского термального источника (с поправкой на фракционирование в стволе скважин и канале источника),

б) воды р. Вулканной на истоке из ледника вулкана Мутновский,

в) воды из реки Жировая,

г) воды из реки Фальшивая,

д) термальной воды из скважины Родниковая (Вилючинские источники),

е) метеорная линия (линия Крейга),

ж) линия смешения метеорной и магматической воды.

На рисунке ясно видно, что по изотопным данным, наиболее вероятной областью водного питания Мутновского месторождения (скважин), Нижне-Жировских и Вилючинских источников может являться вода ледников Мутновского вулкана. Все пробы флюида из скважин, находятся в диапазоне $-13\text{‰} < \delta O^{18} < -18\text{‰}$ и $-106\text{‰} < \delta D < -125\text{‰}$.

Метеорные воды бассейнов рек Фальшивая и Жировая - не подходят на эту роль, являясь более тяжелыми ($-11,5\text{‰} < \delta O^{18} < -13,5\text{‰}$ и $-82\text{‰} < \delta D < -93\text{‰}$).

Водное питание за счет таяния ледника в кратере Мутновского вулкана достаточно для обеспечения циркуляции в системе питающих каналов Северо-Мутновской вулканотектонической зоны с расходом в сотни кг\с. Площадь постройки вулкана с отметками выше +1400 м абс. составляет 26 км², что при увеличивающейся с высотой интенсивности атмосферных осадков до 5000 мм [10] может обеспечить сток воды с расходом до 4,1 м³/с. Даже если только 2% от этого стока преобразуется в подземный сток, то этого достаточно для обеспечения притока глубинного теплоносителя по участку Дачный, который оценивается в 55 кг/с [4]. Немаловажным является также приподнятое на 1-2 км положение рассматриваемой области водного питания.

Подобное предположение, несмотря на гораздо меньший массив исходных данных по изотопии, рассматривалось нами ранее в [3,5,7].

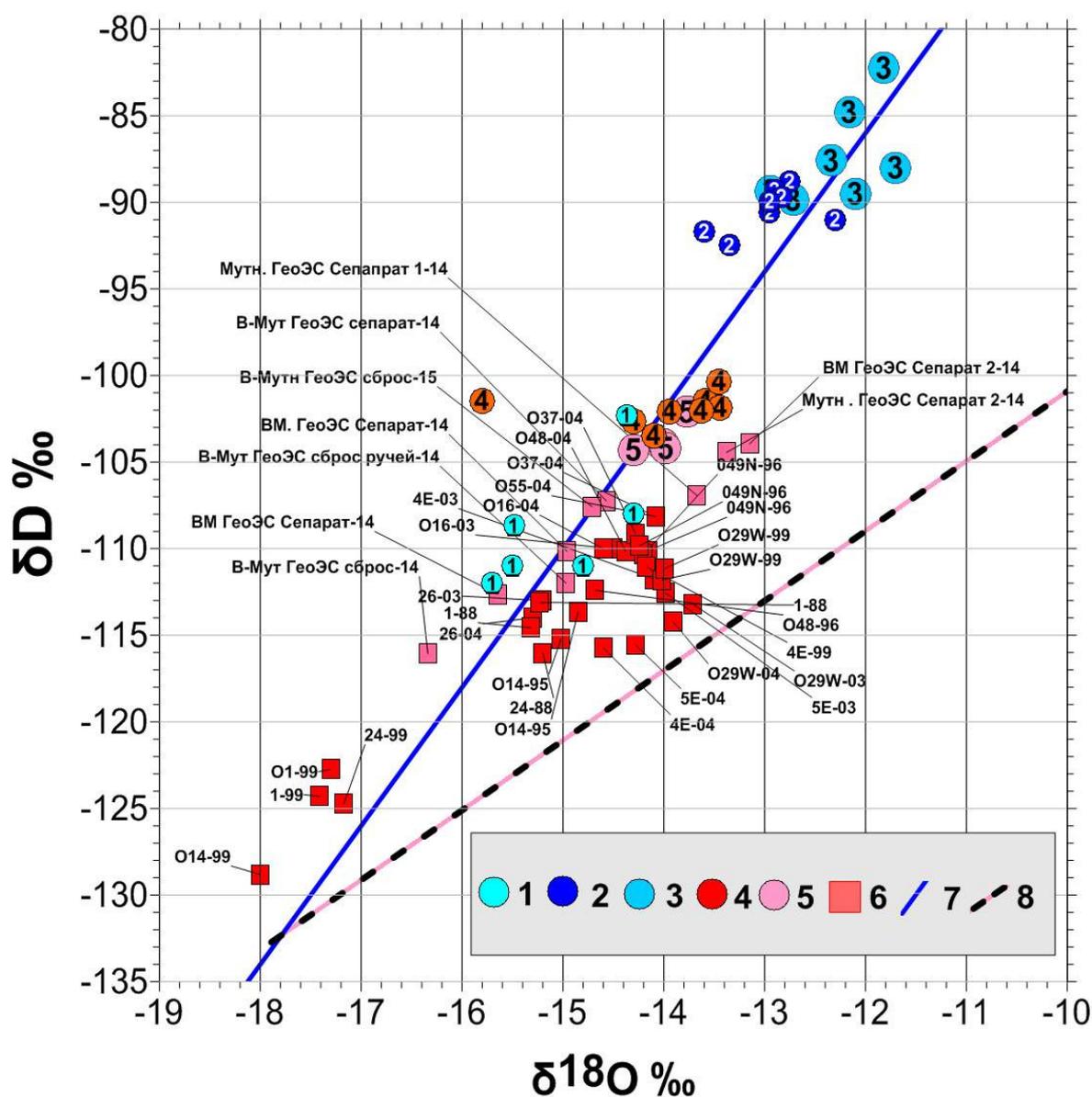


Рис. 1. Изотопный состав воды (δD и $\delta^{18}O$). Условные обозначения: 1 – вода ручья из ледника вулкана Мутновский, отбор проб осуществлялся в 1999, 2001, 2004, 2005, 2014, 2015 гг.; 2 – вода из реки Жировая, отбор проб осуществлялся в 2014, 2015 гг.; 3 – вода из реки Фальшивая, отбор проб осуществлялся в 1999, 2014, 2015 гг.; 4 – вода из Нижне-Жирового источника, отбор проб осуществлялся в 2005, 2009, 2010, 2011, 2012, 2013, 2014, 2015 гг.; 5- вода из скважины Родниковая (Вилючинские источники), отбор проб осуществлялся в 2012, 2013, 2014, 2015 гг.; 6 – вода из скважин Мутновского геотермального месторождения, отбор проб осуществлялся в 1998, 1995, 1996, 1999, 2003, 2004, 2014, 2015 гг.; 7 – метеорная линия (линия Крейга); 8 – линия смешения метеорной и магматической воды. Пробы отобраны А.В. Кирюхиным, А.Ю. Поляковым. Анализ выполнен М. Такахаси (1995-98), В.А. Поляковым (1988, 1998, 1999, 2003, 2004), пробы 2005, 2009, 2010, 2011, 2012, 2013, 2014, 2015 годов проанализированы П.О. Ворониным и А.Ю. Поляковым на изотопном анализаторе LGR IWA 45EP.

Таблица. Исходные значения, использовавшиеся для вычисления поправки на изотопное фракционирования, для Мутновских скважин и Верхне-Жировского источника и результаты пересчета измерений D и O¹⁸, для воды и пара. P_{sep}- давление сепарация (Бар).

№ пробы	Место отбора	Дата	P _{sep} (bar)	Энтальпия скважины (kJ/kg)	Фазовое состояние	δ _L D	δ _L O ¹⁸	δ ₀ D	δ ₀ O ¹⁸
МК96-1	049N	13.12.1995	0.92	1260	вода	-100,9	-11,9	-109,5	-13,8
МК96-2	049N	20.12.1995	0.92	1260	вода	-102,1	-12,3	-110,7	-14,2
МК96-3	049N	27.12.1995	0.92	1260	вода	-101,5	-12,2	-110,1	-14,1
МК96-5	049N	14.02.1996	0.92	1260	вода	-101,3	-12,2	-109,9	-14,1
МК96-7	049N	22.02.1996	0.92	1260	вода	-102,0	-12,3	-110,6	-14,2
МК96-9	049N	28.02.1996	0.92	1260	вода	-101,9	-12,3	-110,5	-14,2
МК96-11	049N	10.03.1996	0.92	1260	вода	-101,1	-12,4	-109,7	-14,3
МК96-12	049N	18.04.1996	0.92	1260	вода	-101,5	-12,2	-110,1	-14,1
МК96-13	049N	24.04.1996	0.92	1260	вода	-101,5	-12,3	-110,1	-14,2
МК96-16	049N	01.05.1996	0.92	1260	вода	-101,7	-12,3	-110,3	-14,2
МК96-17	049N	07.05.1996	0.92	1260	вода	-101,2	-12,4	-109,8	-14,2
МК96-21	O48	28.07.1996	0.92	1500	вода	-101,3	-12,3	-112,4	-14,7
МК96-22	O14	10.08.1995	0.92	2050	вода	-98,4	-11,3	-115,2	-15,0
МК96-23	O14	01.09.1995	0.92	2050	вода	-96,8	-11,2	-113,7	-14,9
МК88-51	1	02.08.1988	0.92	1500	вода	-102,0	-12,8	-113,1	-15,2
МК88-86	1	02.07.1988	0.92	1450	вода	-104,0	-13,0	-114,6	-15,3
МК88-129	24	09.09.1988	0.92	1400	вода	-106,0	-13,0	-116,0	-15,2
АК 1999	O16	04.01.1999	0.92	2690	вода	-98,0	-11,3		
АК 1999	4E	05.11.1998	0.92	1206	вода	-103,0	-12,4	-111,1	-14,2
АК 1999	26	06.02.1999	0.92	2770	вода	-101,0	-15,3		
АК 1999	O29W	14.02.1999	0.92	1183		-104,0	-12,3	-111,8	-14,0
АК 1999	O29W	15.02.1999	0.92	1214	вода	-103,0	-12,2	-111,1	-14,0
АК 1999	O14	1999	0.92	1890	вода	-113,9	-14,7	-128,8	-18,0
АК 1999	O1	1999	0.92	1400	вода	-112,8	-15,1	-122,7	-17,3
АК 1999	1	1999	0.92	1407	вода	-114,3	-15,2	-124,3	-17,4
АК 1999	24	1999	0.92	1300	вода	-115,8	-15,2	-124,7	-17,2
АК 1999	O16	04.01.1999	8.4	2690	пар	-217,0	-14,6		
АК 1999	4E	05.11.1998	7.3	1206	пар	-214,0	-16,3	-208,0	-13,8
АК 1999	26	06.02.1999	10.1	2770	пар	-181,0	-15,3		
АК 1999	O29W	14.02.1999	7.3	1183	пар	-170,0	-17,0	-163,5	-14,5
АК 1999	O29W	15.02.1999	7.3	1214	пар	-179,0	-17,1	-172,7	-14,6
АК 2003	O29W	2003	7	1220	вода	-111,0	-12,9	-113,2	-13,7

Таблица. Продолжение

АК 2003	5Е	2003	7	1070	вода	-111,0	-13,4	-112,6	-14,0
АК 2003	4Е	2003	7	1340	вода	-109,0	-13,1	-111,7	-14,1
АК 2003	О16	2003	7	2690	пар	-110,0	-14,5		
АК 2003	26	2003	7	2770	пар	-113,0	-15,2		
АК 2004	О29W	2004	7	1220	вода	-112,0	-13,1	-114,2	-13,9
АК 2004	4Е	2004	7	1340	вода	-113,0	-13,6	-115,7	-14,6
АК 2004	5Е	2004	7	1070	вода	-114,0	-13,7	-115,6	-14,3
АК 2004	О37	2004	7	1200	вода	-106,0	-13,3	-108,1	-14,1
АК 2004	О55	2004	7	1200	вода	-106,0	-13,3	-108,1	-14,1
АК 2004	О48	2004	7	1200	вода	-108,0	-13,6	-110,1	-14,4
АК 2004	О37	2004	7	1200	вода	-107,0	-13,5	-109,1	-14,3
АК 2004	О16	2004	7	2690	пар	-110,0	-14,6		
АК 2004	26	2004	7	2770	пар	-114,0	-15,3		
АК 2014-33	Вода ВМ. ГеоЭС	17.08.2014	7	1200	вода	-108,0	-14,2	-110,1	-15,0
АК 2014-34	Конденсат пара ВМ ГеоЭС	17.08.2014	7	1200	пар	-110,3	-15,6	-103,4	-13,1
АК 2014-35	Вода 2 ВМ ГеоЭС	17.08.2014	7	1200	вода	-101,8	-12,4	-104,0	-13,2
АК 2014-40	Вода ВМ ГеоЭС	19.08.2014	7	1200	вода	-110,5	-14,9	-112,6	-15,7
АК 2014-80	вулкан Мутновский, донное фумарольное поле	18.09.2014	0.92			-82.9	-7.04		
АК 2014-86	Мутн. ГеоЭС Вода 1	18.09.2014	7	1200	вода	-104,8	-12,9	-106,9	-13,7
АК 2014-87	Мутн. ГеоЭС Пар 1	18.09.2014	7	1200	пар	-69,1	-7,7	-61,9	-5,2
АК 2014-88	Мутн. ГеоЭС Пар 2	18.09.2014	7	1200	пар	-69,8	-8,1	-62,6	-5,6
АК 2014-89	Мутн. ГеоЭС Вода 2	18.09.2014	7	1200	вода	-102,3	-12,6	-104,5	-13,4
АК 2014-90	В-Мут ГеоЭС Пар	18.09.2014	7	1200	пар	-105,2	-14,0	-98,3	-11,5
АК 2014-91	В-Мут ГеоЭС вода	18.09.2014	7	1200	вода	-105,1	-13,8	-107,2	-14,6
АК 2014-92	В-Мут ГеоЭС сброс	18.09.2014	0.92	1200	вода	-108,1	-14,6	-116,1	-16,3
АК 2014-93	В-Мут ГеоЭС сброс ручей	18.09.2014	0.92	1200	вода	-104,0	-13,2	-112,0	-15,0
АК 2015-27	В-Мутн ГеоЭС сброс	16.08.2015	0.92	1200	вода	-99,6	-13,0	-107,6	-14,7

Таблица. Окончание

АК 2005	Нижне-Жировской источник	03.08.2005	0.92	469	вода	-103,0	-14,0	-103,5	-14,1
АК 2009	Нижне-Жировской источник	03.09.2009	0.92	469	вода	-101,0	-15,7	-101,5	-15,8
АК2010-14	Нижне-Жировской источник	09.08.2010	0.92	469	вода	-101,0	-13,5	-101,5	-13,6
АК-2011-25	Нижне-Жировской источник	11.08.2011	0.92	469	вода	-102,2	-14,2	-102,7	-14,3
АК-2012-3	Нижне-Жировской источник	28.07.2012	0.92	469	вода	-101,6	-13,8	-102,1	-13,9
АК-2013-17	Нижне-Жировской источник	22.08.2013	0.92	469	вода	-101,4	-13,4	-101,9	-13,4
АК 2014-24	Нижне-Жировской источник	15.08.2014	0.92	469	вода	-99,9	-13,4	-100,4	-13,5
АК 2015-38	Нижне-Жировской источник	19.08.2015	0.92	469	вода	-101,6	-13,5	-102,0	-13,6

Образцы за 1995-96 гг. отобраны - А.В. Кирюхиным, А.Ю. Поляковым и проанализированы М.Такахашии (Геологическая служба Японии).

Образцы за 1988, 1998, 1999, 2003, 2004 гг. отобраны – А.В. Кирюхиным и проанализированы В.А. Поляковым и В. Бобковым (ВСЕГИНГЕО, Москва).

Образцы за 2005, 2009, 2010, 2011, 2012, 2013, 2015 гг. отобраны – А.В. Кирюхиным и проанализированы П.О. Ворониным, А.Ю. Поляковым (ИВиС).

Образцы за 2014 гг. отобраны – А.В. Кирюхиным, А.Ю. Поляковым и проанализированы П.О. Воронин, А.Ю. Поляковым (ИВиС).

Учитывая контрастный состав локальных метеорных вод и геотермальных флюидов Мутновского месторождения, регулярный мониторинг изотопного состава термальных вод добычных скважин Мутновского месторождения, анализ вариации изотопного состава по конкретным скважинам – может быть использован для выявления зон притока локальных метеорных вод в продуктивный геотермальный резервуар и процессов формирования мало-глубинных пароконденсатных резервуаров.

Выводы

(1) На основании полученных результатов, с учетом поправки на изотопное фракционирование наиболее вероятной областью водного питания Мутновского месторождения (сква-

жин), Нижне-Жировских и Вилючинских источников, является вода ледников Мутновского вулкана.

(2) Метеорные воды бассейнов рек Фальшивая и Жировая – не подходят на эту роль, являясь значительно более тяжелыми по изотопному составу.

(3) Вариации изотопного состава по скважинам могут быть использованы для выявления зон притока локальных метеорных вод в продуктивный геотермальный резервуар и процессов формирования малоглубинных пароконденсатных резервуаров Мутновского геотермального месторождения и повышения эффективности его эксплуатации.

Список литературы

1. *Arnason B.* Hydrothermal Systems in Iceland Traced by Deuterium // *Geothermics*. 1977. Vol. 5. No1/4. P. 140-144.
2. *Кирюхин А.В., Такахаши М., Поляков А.Ю. и др.* Исследование условий водного питания Мутновского геотермального месторождения с использованием данных по изотопии кислорода (^{18}O) и водорода (D) // *Вулканология и сейсмология*. 1998. №4-5. С. 54-62.
3. *Басманов О.Л., Кирюхин А.В., Магуськин М.А. и др.* Термогидрогеомеханическое моделирование вертикальных деформаций земной поверхности при эксплуатации Мутновского геотермального месторождения // *Вулканология и сейсмология*. 2016, № 2, с. 1-13.
4. *Kiryukhin A.V.* Modeling Studies: the Dachny Geothermal Reservoir, Kamchatka, Russia // *Geothermics*. 1996. Vol. 25. No. 1. P. 63-90.
5. *Kiryukhin A.V., Maguskin M.A., Miroshnik O.O., Delemen I.F.* Modeling and Observations of the Enthalpy, Pressure, Chloride, CO_2 and Vertical Deformation Transient Change in the Mutnovsky Geothermal Field (Kamchatka, Russia) // *PROC., Thirty-Eighth Workshop on Geothermal Reservoir Engineering Stanford University, Stanford, California, February 11-13, 2013*, 8 p.
6. *Вакин Е.А., Кирсанов И.Т., Кирсанова Т.П.* Термальные поля и горячие источники Мутновского вулканического района // *Гидротермальные системы и термальные поля Камчатки, Владивосток 1976 г.*, С. 86-114.
7. *Кирюхин А.В.* Моделирование эксплуатации геотермальных месторождений // *Владивосток, 2002*. 195 с.
8. *Кирюхин А.В., Кирюхин В.А., Манухин Ю.Ф.* Гидрогеология вулканогенов // *С-Петербург, Наука, 2010*, 395 с.
9. *Таран Ю.А., Пилипенко В.П., Рожков А.М.* Геохимия гидротермальных растворов Мутновской гидротермальной системы // *Геотермические и геохимические исследования высокотемпературных гидротерм* / Ред. Сугробов В.М. М.: Наука, 1986., С. 140-189

10. *Вакин Е.А.* Гидрогеология современных вулканических структур и гидротермы юго-востока Камчатки. Диссертация. На соискание ученой степени кандидата геолого-минералогических наук. Петропавловск-Камчатский, 1968, 250 с.
11. *Pruess K., Oldenburg C., Moridis G.* TOUGH2 User's Guide, Version 2.0 // Report LBNL-43134, Berkeley, CA, USA. 1999. 198 p.
12. *Кирюхин А.В., Слоцов И.Б., Фазлуллин С.М. и др.* Отчет по договору № 32 от 15.09.98 г. по теме "Подготовка программы испытаний скважин, проведение работ по газогидрохимическому опробованию скважин и составление отчета, обобщающего данные опытных выпусков теплоносителя", предусмотренных в составе работ по контракту № 589/35806573/8-0002/02". Петропавловск-Камчатский, ИВ ДВО РАН, 2000 г., 23 с.