

УДК 550.424.6

О ВАРИАЦИЯХ РАДИОАКТИВНОСТИ И ОБЪЕМНОЙ АКТИВНОСТИ РАДОНА (OARn) В КАЛЬДЕРАХ КАРЫМСКОЙ И АКАДЕМИИ НАУК, В СВЯЗИ С ИЗВЕРЖЕНИЯМИ ВУЛКАНА КАРЫМСКОГО И КРАТЕРА ТОКАРЕВА

Андреев В.И., Ананьев В.В.

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

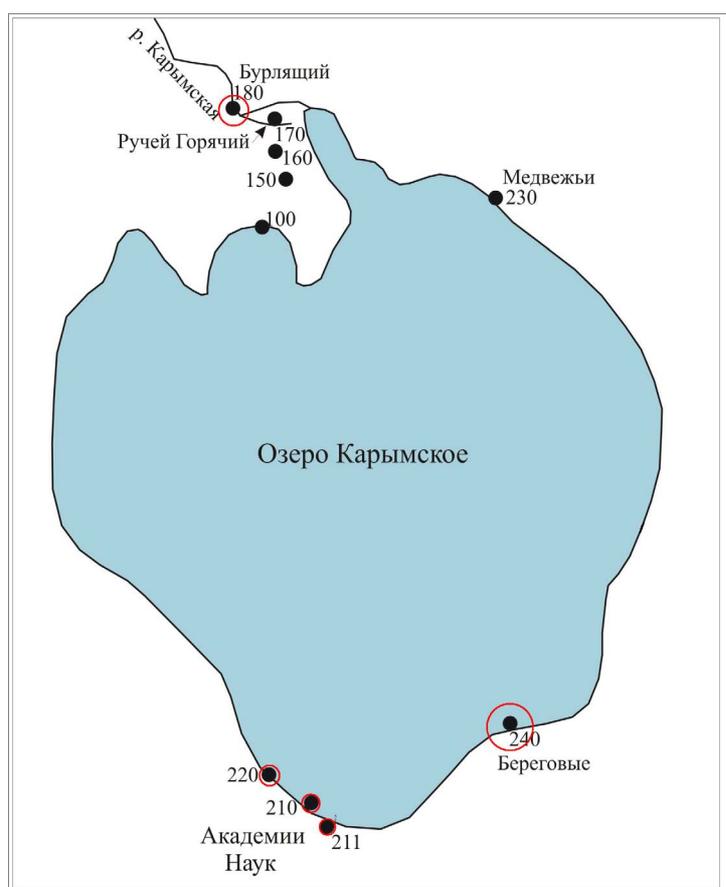
Аннотация

В работе приведены и систематизированы данные исследований объемной активности радона (OARn) в спонтанных газах термальных источников кальдер Карымской и Академии Наук, а также периодических измерений радиоактивности вулканогенных пород этих объектов. Показано многократное увеличение OARn в спонтанных газах источников приуроченных к вулканам Карымскому и кратеру Токарева с началом извержений, произошедших синхронно 02.01.1996 г., и последующее в течение нескольких лет прерывистое уменьшение этого параметра. Сходная, хотя и менее четко выраженная тенденция в связи с извержением, наблюдалась в отношении гамма-активности свежих вулканогенных пород. По представлениям авторов работы, (со ссылками на экспериментальные данные и работы других исследователей) выявленные изменения OARn и гамма-активности обусловлены значительным увеличением эманационной способности и проницаемости вследствие деформации и разогрева горных пород.

Введение

Режимные наблюдения в области определения γ -радиоактивности изверженных пород и объемной активности радона (OARn) на действующих вулканах неизменно представляют собой значительный интерес. Гамма-активность создается, преимущественно, четырьмя радионуклидами: ^{238}U (доля в общем уране – 99.3 %), ^{235}U (доля – 0.7%), ^{232}Th и K , вернее его радиоактивным изотопом – ^{40}K , доля которого в общем калии – 0.12%. Эти четыре составляющие, в общих чертах, взаимосвязаны. Содержание калия, обычно, прямо соотносится с содержанием естественных радиоактивных элементов (ЕРЭ). Более определенно содержание ЕРЭ в породах связано с их типом и генезисом. Радон является α -активным радиоэлементом (инертным газом) с периодом полураспада 3.8 дня и образуется при распаде ^{226}Ra , который, в свою очередь, является продуктом распада ^{238}U . Эманационная или радоновая съемка часто дает заметный разброс данных и сильно зависит от существенной (не менее 2 порядков) разницы концентраций радона OARn в спонтанных газах и в почвенном воздухе, где обычно производятся измерения. В атмосфере концентрация радона на 2–3 порядка ниже, чем в почвенном воздухе. Более стабильно содержание радона в воде, хотя и в этом случае приходится принимать во внимание ряд поправок. Тем не менее, вариации содержания радона успешно используются для прогноза землетрясений, извержений и во многих других прикладных и научных целях [7,10].

В 1996–2007 годах проведены систематические измерения концентрации радона (OARn) в свободных (спонтанных) газах термальных источников, связанных территориально с постройками и извержениями кратера Токарева в Карымском озере, вулкана Карымского и с сопутствующей этим извержениям сеймотектонической активизацией и пе-



Районы взятия проб.

- 100 – рассредоточенные выходы у северного берега озера.*
- 150 – воронка 5.*
- 160 – воронка 6.*
- 170 – выходы газа в Горячем ручье.*
- 180 – выходы в источнике Бурлящем.*
- 210 – режимный источник Академии Наук.*
- 211 – самый восточный источник АН.*
- 220 – Западная группа Академии Наук.*
- 230 – Медвежьи источники.*
- 240 – Береговые источники.*

Рис. 1. Карта-схема Карымского озера и отбора проб спонтанного газа.

риодические измерения гамма-активности (γ). Измерения гамма-активности проводились радиометром СРП-01, OARn – радиометром РГА-01. Методика измерений подробно описана в работе [5].

Термальные источники Карымского озера

Документальное подтверждение деятельности термальных источников на берегах Карымского озера в период до 1996 года, есть только в отношении источников Академии Наук, впервые описанных Троицким в 1938 г. Предположение о существовании ряда других термальных источников: вблизи бывшего истока реки Карымской (ныне это источники Бурлящие (точка 180), источники Медвежьи (точка 230) у восточного берега озера, источники Береговые (точка 240) у южного берега) – были высказаны предыдущими исследователями [6]. После извержений вулкана Карымского, начавшегося 02.01.1996 и кратера Токарева возникшего одновременно с началом извержения вулкана Карымского и извергавшегося всего один день, произошла крупная перестройка рельефа и гидрологического режима кальдер Карымской, Академии Наук и их окрестностей.

С возникновением, возможно, в преддверии возникновения кратера Токарева и его извержением активизировались источники Академии Наук. Возникли новые парогазовые выходы в Западной группе источников Академии Наук, в том числе гейзер, обозначились источники Бурлящие в русле реки Карымской, Медвежьи и Береговые на восточном и юж-

О ВАРИАЦИЯХ РАДИОАКТИВНОСТИ И ОБЪЕМНОЙ АКТИВНОСТИ РАДОНА (OARN) В КАЛЬДЕРАХ КАРЫМСКОЙ И АКАДЕМИИ НАУК, В СВЯЗИ С ИЗВЕРЖЕНИЯМИ ВУЛКАНА КАРЫМСКОГО И КРАТЕРА ТОКАРЕВА

Таблица 1. OARN в источниках кальдер Академии Наук и Карымской в 2003 г.

№ проб/об. %	160	170	180	210	211	230	240	311
He	0	0.002	0.013	0	0	0	0.002	0
H ₂	0	0	0	0	0	0	0	0
O ₂	19.029	0.9	1.5	22.347	26.241	1.746	0.935	0.375
Ar	0.934	1.5	1.66	1.56	1.524	1.813	0.869	0.02
N ₂	76.018	49.48	89.58	72.842	69.164	94.429	30.927	1.02
CO ₂	4	0.1	7.24	3.2	3.056	1.92	64.96	98.57
CH ₄	0.02	48.12	186·10 ⁻⁶	0.05	0.015	0.092	2.286	0.018
C ₂ H ₆	47.7·10 ⁻⁶	н.о.	0	201.2·10 ⁻⁶	46.9·10 ⁻⁶	278.9·10 ⁻⁶	н. о.	85.5·10 ⁻⁶
C ₂ H ₄	26.2·10 ⁻⁶	н.о.	14.0·10 ⁻⁶	34.4·10 ⁻⁶	23.2·10 ⁻⁶	11.2·10 ⁻⁶	н. о.	0
C ₃ H ₈	2.6·10 ⁻⁶	н.о.	131·10 ⁻⁶	20.9·10 ⁻⁶	7.0·10 ⁻⁶	27.7·10 ⁻⁶	70.93·10 ⁻⁶	0.9·10 ⁻⁶
C ₃ H ₆	0.14·10 ⁻⁶	50.3·10 ⁻⁶	0.71·10 ⁻⁶	5.5·10 ⁻⁶	7.0·10 ⁻⁶	0.7·10 ⁻⁶	86.15·10 ⁻⁶	0.4·10 ⁻⁶
iC ₄ H ₁₀	0	16.81·10 ⁻⁶	52.7·10 ⁻⁶	1.1·10 ⁻⁶	0.54·10 ⁻⁶	5.4·10 ⁻⁶	11.46·10 ⁻⁶	1.0·10 ⁻⁶
nC ₆ H ₁₄	0	16.37·10 ⁻⁶	36.15·10 ⁻⁶	3.3·10 ⁻⁶	1.4·10 ⁻⁶	6.7·10 ⁻⁶	13.64·10 ⁻⁶	1.8·10 ⁻⁶
OARN	920	1100	50000	110000	17000	370	18000	2200**
Бк/м	<<	<<	<	<		<<<	>	<
(n)	(6)	(10)	(18)	(20)	(4)	(5)	(4)	(6)
R л/сек.	0	0.1	5	1	2	0.1	10	25

В предпоследней строке таблицы: вверху – среднее, включая 2005 г, в середине – значки > и < означают тенденцию изменения больше – меньше; два, тем более три одноименных значка – усиление тенденции в 2005-2008 гг. Например, в пробе 170 содержание CH₄ уменьшилось в 6, а в пробе 240 увеличилось в 2 раза.

(n) - количество проанализированных проб.

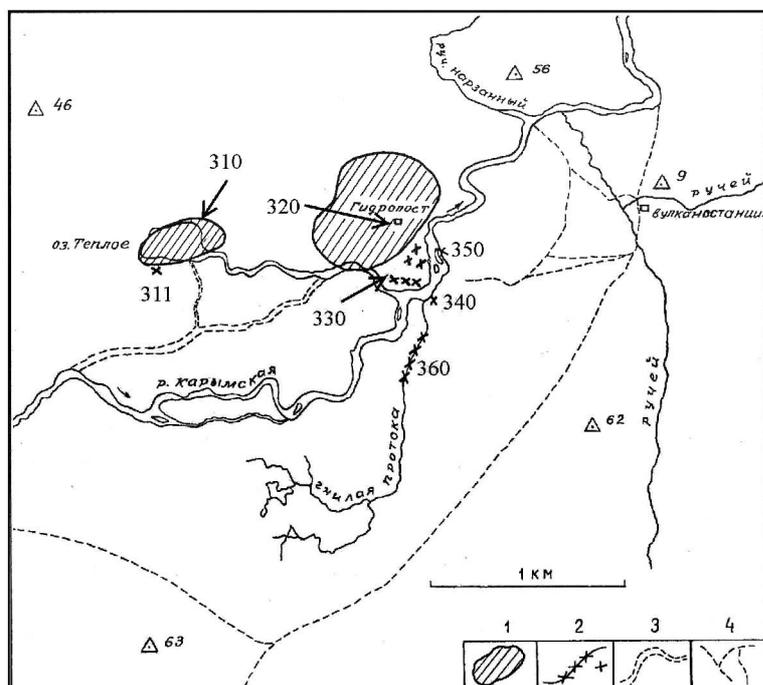
R – расход газа.

311 - Карымские источники, место показано на схеме.

ном берегах озера (рис. 1). На северном секторе кратера Токарева, образовавшем полуостров Новогодний, образовалось три просадочные (1, 2, 3) воронки и одна взрывная (4) воронка. В последующие годы возникли еще две просадочные воронки (5 и 6).

Измерения гамма-активности в указанных районах показали, что повышенные значения γ были: в кратере Карымского вулкана в межпараксизмальный период весной 1989 года – 14 мкР/ч, при обычной величине γ на современных (возрастом несколько десятков лет) лавовых потоках в пределах 8 мкР/ч и на шлаковых полях, порядка 6 мкР/ч, в северном секторе кратера Токарева, через два месяца после его возникновения – 39 мкР/ч, а в последующие годы – в пределах 7 мкР/ч.

Величина OARN в воронках 1–3 достигала в первые годы после извержения кратера Токарева значений в первые тысячи Бк/м³, затем, в течение 3–4 последующих лет, OARN плавно снижалась до фоновых значений (~50 Бк/м³). В воронке 4 образовалось небольшое озерко, у берегов которого в течение последующих нескольких лет выделялся спонтанный газ с OARN в пределах 1,5 кБк/м³. Озерко в воронке не замерзало до 2005 года. Воронка 5 функционировала с 1997 по 2000 гг и максимальная OARN в выделяющихся из неё спонтанных газах достигала 1 кБк/м³. Воронка 6 возникла в 1998 г и выделялась по заметному образованию возгонов (в основном сульфатов с небольшой примесью хлоридов).



Условные обозначения:
 1 – Поля преимущественного расположения термальных источников до извержения 1996 г
 2 – Поля расположения термальных источников после извержения 1996 г. Трехзначные цифры – конкретные источники.
 3 – Бывшее русло реки Карымской
 4 – Полевые тропы

Рис. 2. Карта-схема расположения источников в южном секторе кальдеры Карымского вулкана.

Гамма-активность на дне воронки в первые годы XXI века достигала 15 мкР/ч, OARn была в пределах 2 кБк/м³. (рис. 1, табл. 1)

В первые годы после извержения кратера Токарева повышенная до 1–2 кБк/м³ OARn сохранялась в многочисленных слабых выходах газа на мелководье у северной кромки кратера Токарева, в фумаролах в русле ручья Горячего и в районе термальных полей источников Медвежьих. В 2007–2008 гг фумарольная деятельность всех приуроченных к полуострову Новогоднему (северному сектору кратера Токарева) и Медвежьих термальных источников заметно ослабла или прекратилась. В 2009–2010 гг сравнительно стабильная фумарольная деятельность с выделением фумарольных газов с OARn > 10 кБк/м³ сохранилась на трех группах термальных источников: Бурлящих, Береговых и Академии Наук (Восточной и Западной групп) (рис. 1).

Термальные источники кальдеры вулкана Карымский

Термальные источники Карымские, расположены в южном секторе кальдеры Карымской на сравнительно пологом протяженном участке долины реки Карымской, преимущественно, на её левом берегу. Большая часть этих источников образовывала во время своей деятельности небольшие, высотой, обычно, в пределах 1 м, холмики – грифоны с кратерами диаметром на выходе 15–20 см, редко больше, из которых изливается термальная вода и выделяются пузырьки газа. Такие грифоны расположены в заболоченной долине реки иногда на мелководье. Самый мощный грифон с кратером диаметром порядка 0,6 м до начала последнего извержения был расположен на дне Теплого озера, на глубине ~ 1 м. Из этого грифона весьма активно выделялся фумарольный газ, состоящий более чем на 98 % из CO₂ и обладающий высокой OARn, в среднем порядка 10 кБк/м³, подверженной значительным, до десятикратным, вариациям, связанным положительной корреляцией с режи-

мом извержения Карымского вулкана [11]. Расход газа этого источника, по нашим наблюдениям до извержения 1996 г, был не менее 50 л/сек. Приблизительно столько же газа выделялось из всех остальных Карымских источников, общее количество которых составляет несколько десятков.

После извержения вулкана Карымского и кратера Токарева в 1996 г Карымские источники, расположенные на обширных геотермальных полях, сместились на несколько десятков метров к югу (рис. 2). Также как в обрамлении кальдеры Академии Наук и на полуострове Новогоднем, в районе геотермальных полей Карымских источников возникло много новых выходов спонтанных газов [3]. В первые годы после извержений 1996 г, вновь возникшие и активизировавшиеся старые источники обладали сравнительно высокой, до 2 кБк/м³ OARN, постепенно, иногда прерывисто, снизившейся в течение 5–7 лет до нескольких сотен Бк/м³. В 2006–2008 гг значимая OARN, порядка 1 кБк/м³, наблюдалась только в спонтанных газах вновь возникшей группы источников в небольшом водоеме-озерке близ южного берега озера Теплового. (точка 311),.

Еще одним следствием сопутствующей извержением 1996 г сеймотектонической активизации было полное прекращение деятельности вышеупомянутого мощного источника в Теплом озере в начале или в преддверии извержения.

Газ – носитель радона существенно различается в разных источниках (табл. 1). В источниках Бурлящих преобладает N₂ (~90 %) при заметном количестве CO₂ (7 %), в источниках Академии Наук также преобладает N₂ (~70 %), при заметном количестве CO₂ (~3 %) и сравнительно большом содержании O₂ до 26 %. В Карымских источниках явно преобладает CO₂ до 98 %, большая доля этого окисла в источниках Береговой группы до 65 %, при заметном количестве N₂ до 31%.

Обсуждение результатов

Вывод, следующий из приведенных содержаний главных компонентов спонтанных газов и OARN – отсутствие связи повышенных концентраций радона исследованных источников с перечисленными компонентами. Не просматривается также связи гелия с составом газа, положением источников и режимом извержения.

Метан в ручье Горячем, определенно, связан с захоронением и последующим разложением органики, возможно и рыбы, общее количество которой в озере, по оценке С. И. Куренкова, (устное сообщение) достигало порядка 30 т. Около 0,1 от этого количества могло быть захоронено при уходе рыбы из озера

Рыба – озерная нерка, кокань, была выпущена в озеро в 1975 г. За 20 лет ее численность в озере могла достигнуть 1 млн шт (30 т). Небольшая часть рыбы «скатывалась» из озера вниз по течению постоянно в течение десяти лет, предшествующих извержению. Перед извержением 02.01.1996 г начались землетрясения, стала быстро повышаться температура воды и меняться ее состав. В такой аварийной ситуации рыба, скорее всего, стремилась покинуть озеро. Однако, события развивались быстро и какая-то часть рыбы уйти не успела.

За 4–7 лет разложение органики при повышенной, в результате гидротермальной деятельности температуре, должно было, в основном, завершиться, и концентрация метана в спонтанных газах заметно снизилась, что и показали систематические измерения. Среди остальных источников, сравнительно высокой и стабильной концентрацией метана в

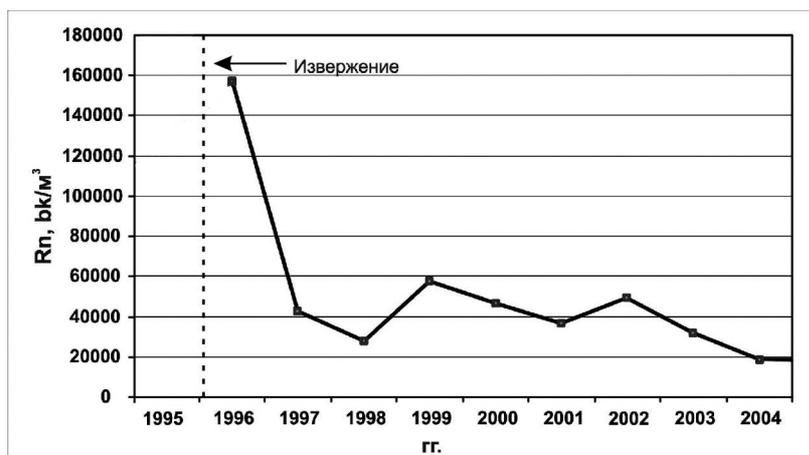


Рис. 3. Объединенный график OARn источников в кальдере Академии Наук с 1996 (начало извержения) по 2004 гг. Пунктир означает отсутствие последних данных.

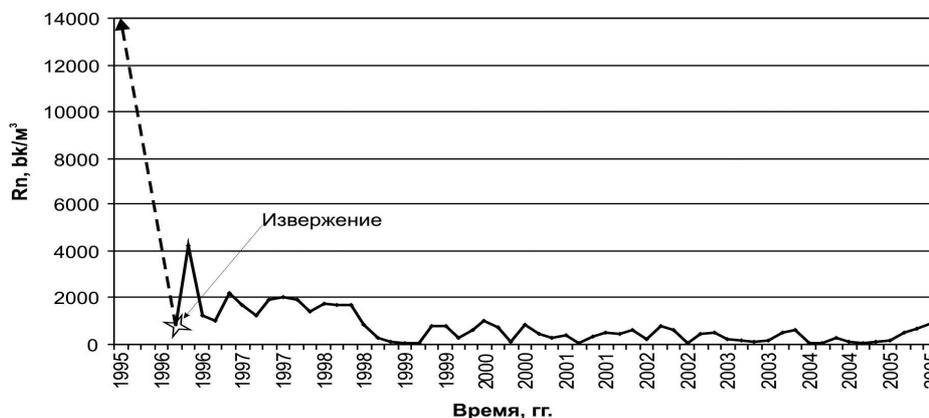


Рис. 4. Изменение объемной активности радона (среднее значение) в спонтанных газах термальных источников кальдеры вулкана Карымского с 1995 по 2005 годы.

спонтанных газах, выделяются Береговые. В спонтанном газе этих источников при стабильной концентрации метана порядка 5%, больше некоторых «тяжелых» углеводородов, в частности C_3H_8 и C_3H_6 , чем в газах других термальных источников. Хотя содержание этих компонентов в пределах 10^{-6} объемных %, (что хотя и на 6 порядков больше, чем концентрация радона, однако для поисков УГВ все же мало).

Высокое содержание кислорода в источниках 210, 211 (выше, чем содержание этого газа в атмосфере), вероятно, объясняются подпиткой этих источников метеорными водами с последующим их прогревом и дегазацией растворенного газа. Так как растворимость кислорода в воде выше растворимости азота почти в два раза, это объясняет и повышение содержания кислорода в спонтанном газе данных источников [9]. Смешение холодных метеорных вод с термальными, происходит, видимо, на некоторой глубине (в пределах первых десятков метров). Затем смешанные воды нагреваются и растворенные газы, в том числе азот и кислород выделяются в отношении $\sim 1 : 2$. Другие источники дополнительного кислорода в спонтанных газах, упомянутые в работе [2] теоретически возможны, однако их вклад невелик.

При сравнении графиков суммарной OARn в спонтанных газах термальных источников кальдер Академии Наук и Карымской видно их подобие. В начале, возможно, в преддверии извержения, происходит многократное увеличение OARn, после чего следует плавный, иногда прерывистый спад (рис. 3 и 4).

Физическая сущность этого явления – изменение эманационной способности силикатных пород при дислокациях, исследована экспериментально [8]. По данным о большинстве исследованных землетрясений эти события предварялись увеличением OARn в спонтанных газах или в водах, приуроченных к эпицентрам землетрясений термальных источников [7]. В механизме образования землетрясений и извержений вулканов есть много общего, и вариации OARn могут предшествовать изменениям режима извержений вулканов [11]. Еще один источник радона за счет разогрева вмещающих пород был сначала вычислен и предсказан, а затем подтвержден исследованием этого природного явления [1].

Очевидно, средняя суммарная OARn, приведенная для групп термальных источников, расположенных в кальдерах Карымской и Академии Наук, определялась, в какой-то мере, всеми перечисленными факторами. Ясно также, что формальный подход к исследованию связи вариаций OARn, с режимом извержения вулкана может оказаться непригодным, что хорошо иллюстрируется полным прекращением деятельности термального источника в Теплом озере. (По аналогии с предыдущими вариациями прошлых лет, это был бы предвестник прекращения активной деятельности вулкана Карымский).

При сравнении данных по периодическому измерению OARn в спонтанных газах термальных источников в кальдерах Карымской и Академии Наук с рядом других параметров, приведенных в работе [4], просматривается общее подобие результатов предыдущих исследований по сейсмичности, изменению высоты вулкана, режима извержения и представленных данных по OARn.

Список литературы

1. *Адамчук Ю.В., Фирстов П.П.* Радиоактивные эманации в fumarольных газах ряда действующих вулканов Камчатки. // Москва – ЦНИИАтоминформ – 1986. Препринт ИАЭ 4247/1. 1986. М. С. 27.
2. *Андреев В.И., Карпов Г.А.* Радон в спонтанных газах гидротермально-магматической системы кальдеры Академии Наук // Материалы конференции, посвященной Дню вулканолога, 30 марта – 1 апреля 2005 г. Петропавловск-Камчатский. 2005. С. 47–53.
3. *Андреев В. И.* Объемная активность радона в спонтанных газах Карымских гидротермальных источников в 1996 – 2005 гг. // Материалы международного симпозиума «Проблемы эксплозивного вулканизма» к 50 – летию катастрофического извержения вулкана Безымянный. Петропавловск – Камчатский, 2006. С. 166 – 170
4. *Андреев В. И., Магуськин М. А.,* Вариации высоты действующего вулкана Карымский в период 1971 – 2007 гг. (причины, следствия, аналоги) // Вулканология и сейсмология. 2009. №2. С.2–10.
5. *Андреев В. И., Делемень И. Ф., Помозанова Т. Н.* Причины вариаций активности радона в почвенном воздухе на учебном полигоне у западной окраины пос. Сосновка. // Материалы конференции, посвященной дню вулканолога. Петропавловск-Камчатский, 2010, с.115–123

6. *Вакин Е.А., Пилипенко Г.Ф.* Гидротермы Карымского озера после подводного извержения 1996 г. // Вулканология и сейсмология. 1998. № 2. С. 3–28.
7. *Зубков С.И.* Радоновые предвестники землетрясений // Вулканология и сейсмология, 1981, № 6. С. 74–105.
8. *Кабо В. А., Мусин Я. А., Идрисова С. И.* Особенности выделения радона в воду при длительном одноосном сжатии некоторых образцов горных пород.// Физика Земли. Изв. АН СССР. 1989. № 7. С 103–107.
9. *Максимов А.П., Фирстов П.П., Чернев И.И и др.* Мониторинг газового режима теплоносителя Мутновской ГЕОЭС в 2004–2006 гг. // International Workshop: Muttovskiy scientific drilling project. Exploring the Magma-Hydrothermal Connection 24–30 September, 2006. Petropavlovsk-Kamchatsky, Russia, с.69–72.
10. *Титаева НА.* Ядерная геохимия. М.: Изд. МГУ, 2000. 336 с.
11. *Хренов А. П., Дубик Ю. М., Иванов Б. В и др.* Эруптивная деятельность вулкана Карымский за 10 лет (1970–1980 гг.) // Вулканология и сейсмология, 1982. № 4. С. 29 – 49.