

АППАРАТНО-ПРОГРАММНЫЙ КОМПЛЕКС ДЛЯ РЕГИСТРАЦИИ ПОДПОЧВЕННЫХ ГАЗОВ НА ПЕТРОПАВЛОВСК-КАМЧАТСКОМ ГЕОДИНАМИЧЕСКОМ ПОЛИГОНЕ

Будилов Д.И.¹, Фирстов П.П.¹, Макаров Е.О.¹, Исакевич Д.В.²

¹Камчатский филиал ФИЦ ЕГС РАН, г. Петропавловск-Камчатский, budilov@emsd.ru

²Владимирский государственный университет, г. Владимир

Введение

Процессы дегазации Земли неравномерно протекают в пространстве и во времени. В значительной степени они контролируются распределением и величиной напряжений в разломах земной коры различной иерархии. Миграция газов в верхней толще земной коры определяется диффузионными и фильтрационными свойствами горных пород, которые зависят от их проницаемости, пористости и трещиноватости. На фильтрационные свойства геосреды также оказывают влияние вариации напряженно-деформированного состояния геосреды, что должно находить отражение в динамике концентрации подпочвенного газа вблизи дневной поверхности [7].

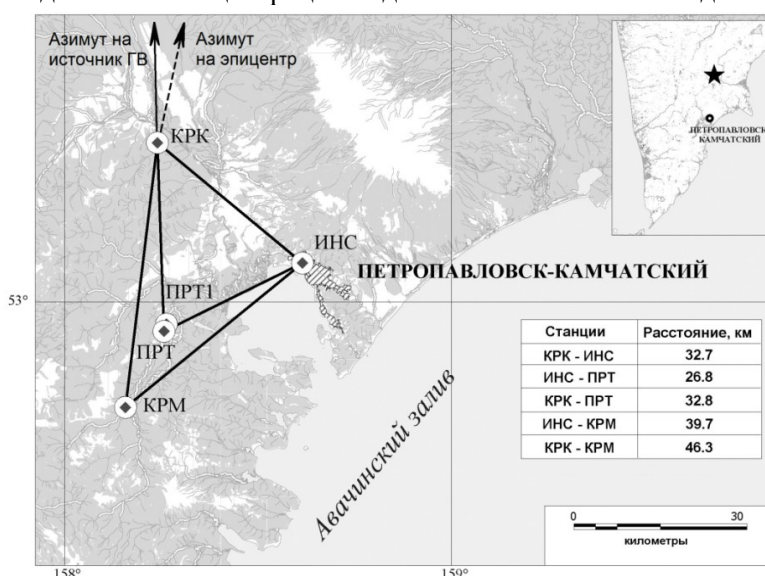
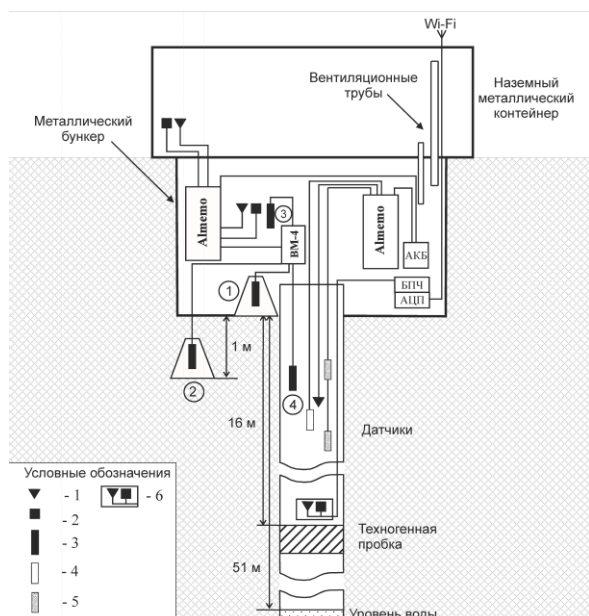


Рис.1. Сеть пунктов регистрации подпочвенных газов на Петропавловск Камчатском полигоне. ИНС – пункт на базе скважины ИИС1 вблизи здания ИВиС (Институт вулканологии и сейсмологии ДВО РАН), ПРТ – пункт в долине ручья Коркино (Паратунский грабен), ПРТ1-геотермальный стационар ИВиС, КРК – пункт в поселке Коряки, КРМ – пункт на реке Карымшина. Звездочкой на врезке показан эпицентр Жупановского землетрясения.

Одним из методов исследования связи динамики концентрации подпочвенных газов с изменениями напряженно-деформированного состояния среды в связи с подготовкой сильных землетрясений является мониторинг радона. Предваряющие сильные землетрясения аномалии ищутся в динамике подпочвенного радона, радона в атмосферном воздухе и радона растворенного в воде. Такие работы усиленно ведутся в течение последних нескольких десятков лет во всех сейсмоактивных регионах Земли. В 1997 г. на Камчатке началось создание сети пунктов мониторинга подпочвенных газов с целью поиска предвестников сильных землетрясений. В настоящее время сеть состоит из 5 пунктов, расположенных вблизи Авачинского залива (рис. 1) [8,9].

Описание пункта «Институт» (ИНС)

Один из наиболее оснащенных в аппаратном плане пункт ИНС расположен вблизи здания Института вулканологии и сейсмологии ДВО РАН в пределах Петропавловского горста. Он создан на основе скважины глубиной 350 м и состоит из бункера, заглубленного на 2.5 м над оголовком скважины, над которым установлен металлический контейнер [6]. В этом пункте осуществляется регистрация R_n (4 канала), CO_2 , H_2 , а также температуры и давления как в бункере, так и в контейнере (рис. 2).

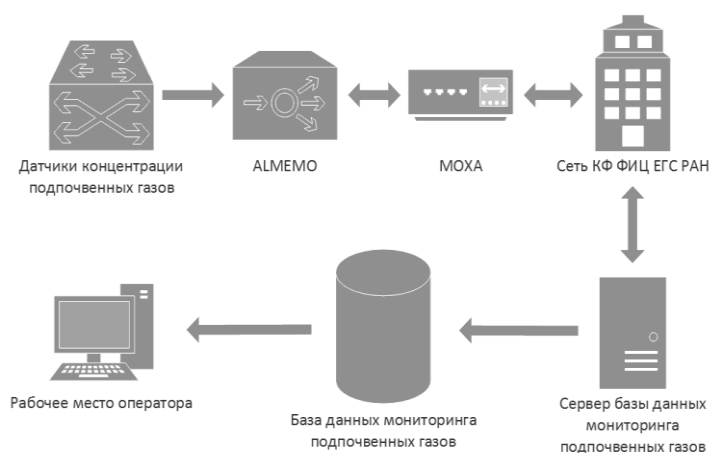


В качестве датчиков концентрации R_n используются газоразрядные счетчики (ГС), позволяющие вести регистрацию его концентрации по β -излучению его дочерних продуктов распада [7]. Как показал многолетний опыт, использование ГС обеспечивает большую надежность, что очень важно для непрерывных наблюдений. С целью повышения чувствительности ГС помещаются в накопительную камеру (оцинкованное ведро, 10 л), которое заглубляется в грунт на глубину от 0.1 до трех метров (рис. 2).

Рис. 2. Схема размещения датчиков в пункте ИНС: 1 – датчик температуры; 2 – датчик давления; 3 – газоразрядный счетчик β -излучения; 4 – датчик CO_2 ; 5 – датчик H_2 ; 6 – прецизионные датчики температуры и давления. BM-4 – четырехканальный формирователь импульсов для регистрации β -излучения прибором ALMEMO [3]

Дополнительно для прецизионных измерений температуры и давления в стволе скважины на глубине ~15 м в 2014 г. был установлен кварцевый датчик ПДТК-0.1MP, обладающий разрешающей способностью $0.01^\circ C$ и 0.05 мм рт. ст. Регистрация через частотомер МЦ-1 производства ООО “КварцСенс” осуществляется с помощью регистратора JORES, разработанного в КФ ФИЦ ЕГС РАН.

Информация снимается с 11 датчиков концентрации подпочвенных газов и метеорологических величин с помощью современных регистрирующих приборов серии ALMEMO фирмы Ahlborn, которые оборудованы системой интеллектуальных коннекторов, обеспечивающих подключение датчиков различных параметров. Для мониторинга предвестниковых параметров сильных землетрясений южной Камчатки в 2016 начал создаваться автоматизированный аппаратно-программный комплекс с целью получения информации в режиме, близком к реальному времени.



В пункте ИНС информация с датчиков поступает на коннекторы двух регистрирующих устройств (ALMEMO: 2590-4S, 2390-8). Оцифровка данных с аналоговых датчиков с частотой дискретизации 6 час^{-1} происходит в коннекторах и регистрируется приборами ALMEMO.

Рис. 3. Блок-схема работы автоматизированного аппаратно-программного комплекса с целью мониторинга концентрации подпочвенных газов в пункте ИНС.

Импульсные разряды с газоразрядных счетчиков через формирователь импульсов и коннектор регистрируются на тех же приборах, что является неоспоримым преимуществом регистраторов ALMEMO. Через COM-порт ALMEMO данные поступают на преобразователь пользовательских интерфейсов (MOXA NPort-5210A) с широким диапазоном рабочей температуры ($-40..+75^\circ C$) и далее по сети ethernet КФ ФИЦ ЕГС РАН информация передается на сервер сбора данных лаборатории акустического и радонового мониторинга КФ ФИЦ ЕГС РАН. После предварительной обработки, происходит запись текущей информации в базу данных «Полигон» [5] мониторинга подпочвенных газов.

Текущая информация в базе данных обновляется с десятиминутным интервалом и визуализируется на созданном автоматизированном рабочем месте оператора (рис. 4), который может наблюдать за динамикой ОА R_n за десятидневный период. Одновременно со сбором данных

выполняется синхронизация системного времени и управление регистрирующими приборами ALMEMO в составе комплексов регистрации концентрации подпочвенных газов [6].

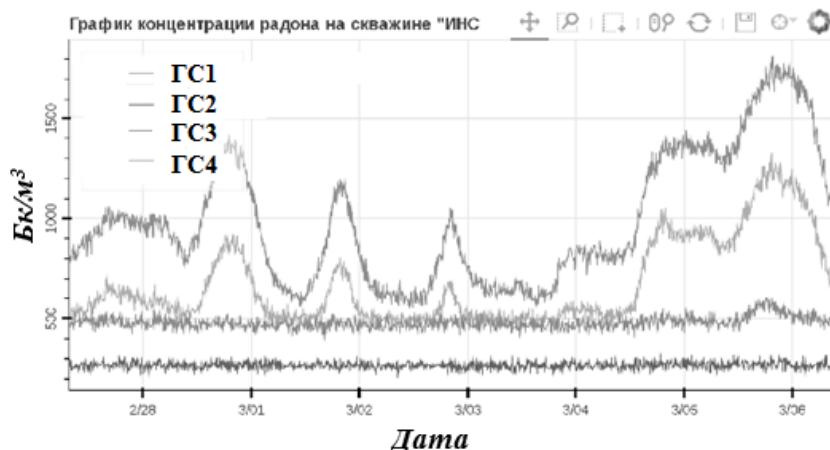


Рис. 4. Экранная форма полученных данных с ГС пункта ИНС за период 28.02. 2017 г. – 08.03. 2017 г.

Методика айгеноскопии для анализа коллективного поведения временных рядов подпочвенного радона.

Получаемые при геофизическом мониторинге данные неоднородны и зашумлены различными помехами. К ним необходимо

применение специальных методов и приемов анализа. Поскольку плотность потока радона с поверхности также зависит от метеорологических величин: влажности, температуры почвенного слоя и, особенно, атмосферного давления, была сделана пробная попытка выделения реперных точек и обнаружения среди них предвестниковых аномалий в рядах ОА Rn с помощью методики «айгеноскопии» [4,11].

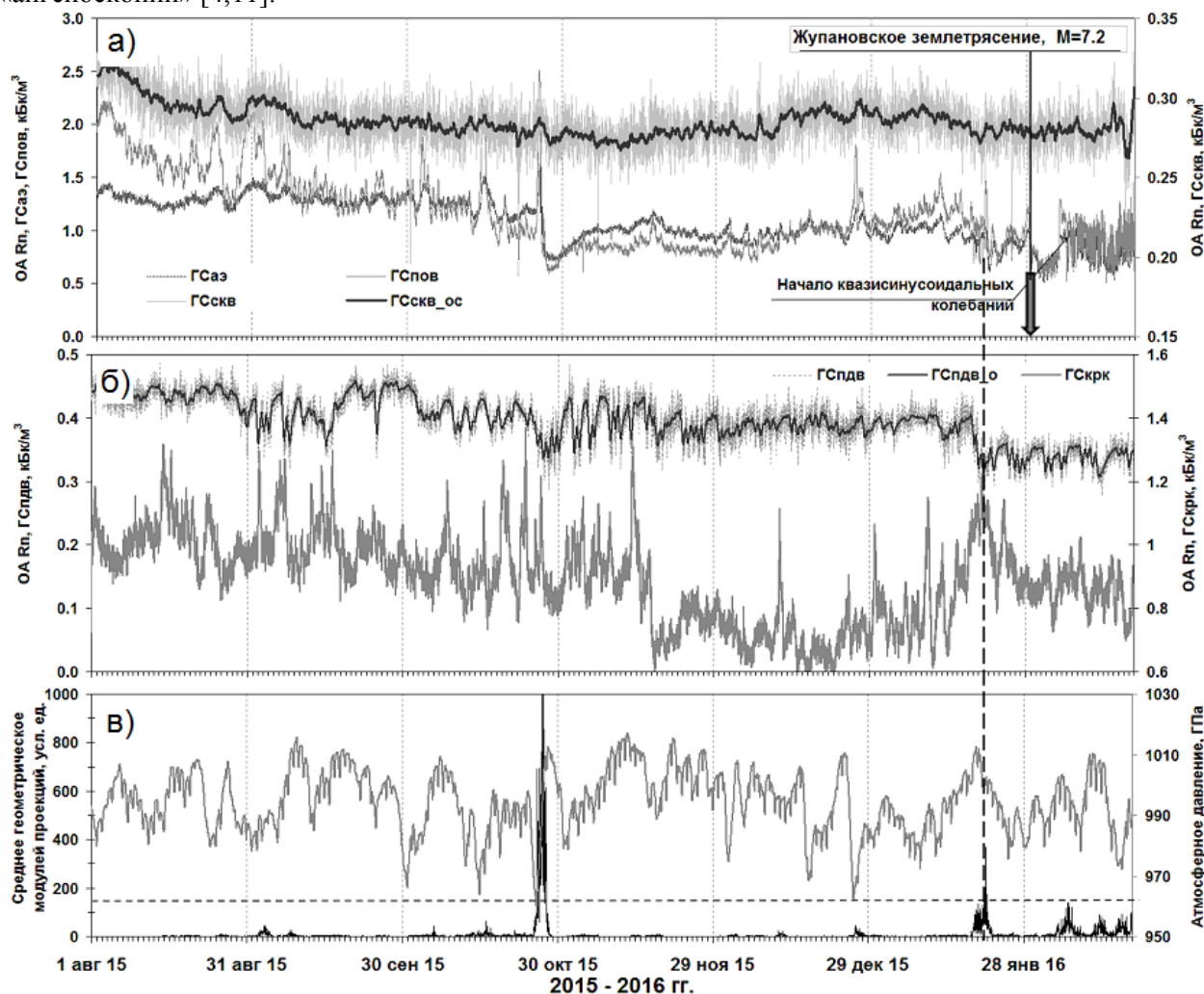


Рис. 5. Исходные временные ряды за период 01.09.2015 г. – 18.02.2017г. для которых была применена методика «айгеноскопии». **а** - динамика ОА Rn для трех ГС в пункте ПРТ, **б** - в пункте КРК, атмосферное давление и **в**-значение среднего геометрического, построенного на абсолютных значениях проекций исходных временных рядов на 2-14 собственные векторы.

Айгеноскопия - группа новых полезных моделей [1-3] для обработки временных рядов и сигналов, основанных на методе анализа собственных векторов ковариационных матриц («eigen vector analysis»). Данный метод также известен как анализ эмпирических ортогональных функций («empirical orthogonal functions analysis») – с целью обнаружения скрытых признаков и закономерностей. Его предназначение - визуализация и автоматический анализ исследуемых сигналов и принятие решений с использованием базиса собственных векторов матриц смешанных моментов сигналов.

Для оценки возможностей «айгеноскопии» для пяти временных рядов ОА Rn полученных, в пунктах ИНС и КРК, на интервале 01.09.2015 г. – 18.02.2017г. был реализован поиск предвестниковой аномалии перед Жупановским землетрясением (ЖЗ) с $M=7.2$ и глубиной очага 177 км [12]. В поле подпочвенного радона на трех пунктах сети была выделены аномалии, предшествующие ЖЗ. Кроме того, в пункте ИНС в этот же период выделяются аномалии в концентрации молекулярного водорода и диоксида углерода. По фазовым сдвигам радоновых аномалий был рассчитан азимут на источник возмущения (предполагаемая «деформационная волна»), которое могло вызвать аномалии. Азимут имеет расхождение с азимутом на эпицентр в 14° [10].

Кривая среднегеометрического, вычисленного для коэффициентов разложения исходного ряда в базисе собственных векторов ковариационной матрицы размерностью 96 дискретов (48 часов) приведена на рис. 5в, где по квантилю 0.99 выделяется две «реперные» точки. Первая «реперная точка» 26-27 октября 2015 г. обусловлена резким уменьшением атмосферного давления, которое вызвало мощный всплеск ОА Rn в накопительных камерах, расположенных в зоне аэрации пункта ИНС. Вторая реперная точка 20.01.2016 г. совпадает с началом появления предвестниковой аномалии ЖЗ, выделенной ранее [10].

На рис. 6 приведена обобщенная структурная схема реализованного на языке Python виртуального устройства, использующего методики обработки «айгеноскопии» [1-3], с помощью которого находились «реперные» точки. Данная схема реализуется для автоматического выделения «реперных» точек на временных рядах, получаемых в реальном времени с ГС пункта ИНС. В блоке 1 по всей имеющейся предыстории и заданной величине интервалов анализа вычисляется ковариационная матрица. Для полученной в блоке 2 ковариационной матрицы (КМ) в блоке 3 вычислялись собственные векторы (СВ), количество которых совпадает с размерностью матрицы.

Для дальнейшей обработки используются не все СВ, а только СВ со 2-го по 14-ый.

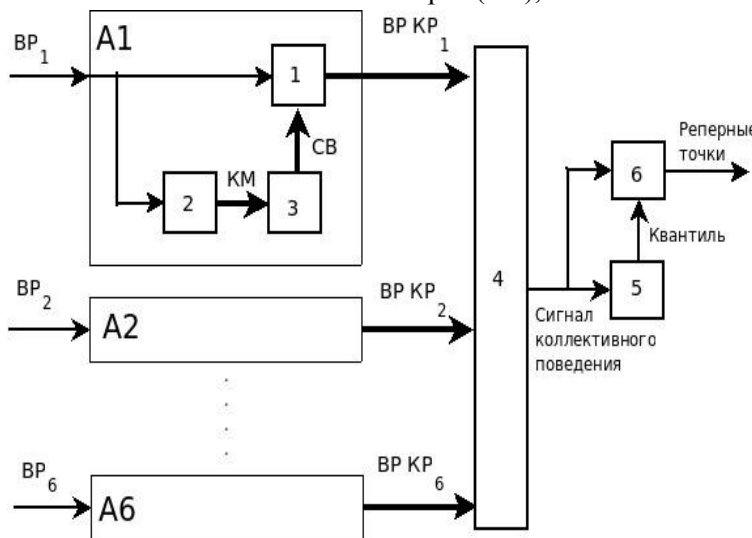


Рис. 6. Структурная схема методики обработки: A1-A6 – «айгеноскопы» для обработки временных рядов с датчиков, блок 1 – вычислитель скалярных произведений, блок 2 – вычислитель ковариационной матрицы, блок 3 – вычислитель собственных векторов, блок 4 – формирователь сигнала коллективного поведения, блок 5 – вычислитель квантилей, блок 6 – решающее устройство, ВР₁ – ВР₆ – временные ряды с датчиков, ВР КР₁ – ВР КР₆ – коэффициенты разложения временных рядов по собственным векторам, КМ – ковариационная матрица, СВ – собственные векторы.

В блоке 1 вычисляются (для каждого интервала анализа) коэффициенты разложения отрезка временного ряда (ВР) по собственным векторам. Численно эти коэффициенты совпадают со скалярными произведениями соответствующего отрезка ВР и соответствующего СВ.

Каждый из блоков A1-A6 представляет собой экземпляр «айгеноскопа» [1]. A1-A6 выдают на своих выходах (для каждого текущего момента времени) коэффициенты разложения ВР КР₁– ВР КР₆ временных рядов ВР₁– ВР₆ на текущем интервале анализа в изменяющихся, адаптивных базисах собственных векторов. Таким образом, на вход блока 4 вычисления сигнала коллективного поведения поступают так называемые главные компоненты временных рядов ВР₁– ВР₆ с датчиков, вычисленные в адаптивных базисах собственных векторов за всю известную к текущему моменту времени предысторию. Затем вычисляется средне геометрическое (СГ) значения всех главных компонент для

каждого момента времени, в соответствии с решением, предложенным в полезной модели [2]. В качестве обоснованных значений порогов выбраны квантили уровня 0.5, 0.75, 0.90 и 0.99 (превышаемые временным рядом коллективного поведения в 50%, 25%, 10% и 1% отсчетов соответственно). Те моменты времени, в которые временной ряд коллективного поведения превышает квантиль заданного уровня, рассматривались в качестве реперных точек. Эта часть обработки осуществляется блоками 5 и 6.

Визуализация результатов анализа производится на сервере лаборатории акустического и радонового мониторинга КФ ФИЦ ЕГС РАН с применением библиотеки Vokeh.

Заключение

С целью автоматизации сбора и оперативной обработки данных с сети пунктов регистрации подпочвенных газов на Петропавловск-Камчатском геодинамическом полигоне в КФ ФИЦ ЕГС РАН ведется разработка специализированного аппаратурно-программного комплекса. Разработаны и внедрены отдельные элементы автоматизированного сбора и первичной обработки данных в реальном времени с одного из наиболее аппаратурно оснащенных пунктов ИНС.

Работа выполнена при финансовой поддержке гранта РФФИ № 16-05-00162.

Список литературы:

1. *Исакевич В.В., Исакевич Д.В.* Сигнализатор значимых отличий. Патент № 133642RU. Дата выдачи патента 05.04.2013 г., срок действия патента до 05.04.2023 г., <http://bankpatentov.ru/node/414199>.
2. *Исакевич В.В., Исакевич Д.В., Грунская Л.В.* Анализатор собственных векторов и компонент сигналов. Патент на полезную модель RU 116242. Дата выдачи патента 30.09.2011 г., срок действия патента до 30.09.2021 г., <http://bankpatentov.ru/node/207042>.
3. *Исакевич В.В., Исакевич Д.В., Грунская Л.В., Фирстов П.П.* Сигнализатор изменений главных компонент. Положительное решение о выдаче патента по заявке № 2013147112 от 22.10.2013 г.
4. *Исакевич В.В., Фирстов П.П., Исакевич Д.В., Грунская Л.В., Макаров Е.О.* Использование методики дискриминантных функционалов для выявления реперных точек во временных рядах концентрации почвенного радона на сети пунктов Петропавловск-Камчатского геодинамического полигона / Проблемы комплексного геофизического мониторинга Дальнего Востока России. Труды Четвертой научно-технической конференции. Петропавловск-Камчатский. 29 сентября-5 октября 2013 г. / Отв. ред. В.Н. Чебров. Обнинск: ГС РАН, 2013. С.59–63.
5. *Копылова Г.Н., Латыпов Е.Р., Пантюхин Е.А.* Информационная система "Полигон": комплекс программных средств для сбора, хранения и обработки данных геофизических наблюдений / Проблемы сейсмологии III-го тысячелетия. Матер. междунар. геофиз. конф. Новосибирск: Изд-во СО РАН, 2003. С. 393-399.
6. *Макаров Е.О., Фирстов П.П., Волошин В.Н.* Аппаратурный комплекс для регистрации концентрации подпочвенных газов с целью поиска предвестниковых аномалий сильных землетрясений Южной Камчатки // Сейсмические приборы. 2012. Том 48. № 1. С. 2-10
7. *Рудаков В.П.* Динамика полей подпочвенного радона сейсмоактивных регионов СНГ: Автореф. дис... докт. физ.-мат. наук. М. 1992 г. 46 с.
8. *Фирстов П.П.* Мониторинг объемной активности подпочвенного радона (^{222}Rn) на Паратунской геотермальной системе в 1997–1998 гг. с целью поиска предвестников сильных землетрясений Камчатки // Вулканология и сейсмология. 1999. № 6. С. 33–43.
9. *Фирстов П.П., Макаров Е.О., Акбашев Р.Р.* Мониторинг концентрации почвенных газов на Петропавловск-Камчатском геодинамическом полигоне в связи с прогнозом сильных землетрясений // Сейсмические приборы. 2015. Т. 51, № 1, с.60-80.
10. *Фирстов П.П., Макаров О.Е., Глухова И.П.* Особенности динамики подпочвенных газов перед Жупановским землетрясением 30.01.2016 г. с $M = 7.2$ (Камчатка) // ДАН. 2017. Т. 472. № 4. С. 462–465.
11. *Фирстов П.П., Исакевич В.В., Макаров Е.О., Исакевич Д.В., Грунская Л.В.* Применение методики айгеноскопии для поиска предвестников сильных землетрясений в поле почвенного радона (^{222}Rn) на Камчатке (август 2012 – август 2013 гг.) // Сейсмические приборы. 2014. Т. 50. № 3, с. 63
12. *Чебров В.Н., Кузнецов Ю.А., Абубакиров И.Р. и др.* Жупановское землетрясение 30.01.2016 г. с $K_s=15.7$, $M_w=7.2$, $I=6$ (Камчатка) // Вестник КРАУНЦ. Науки о Земле. 2016. № 1. Вып. 29. С. 5–16.