

Камчатский филиал Федерального исследовательского центра

«Единая геофизическая служба РАН»

На правах рукописи



**МАКАРОВ Евгений Олегович**

**ОТКЛИК В ДИНАМИКЕ ПОДПОЧВЕННОГО РАДОНА НА ПОДГОТОВКУ  
СИЛЬНЫХ ЗЕМЛЕТРЯСЕНИЙ КАМЧАТКИ И СЕВЕРО-ЗАПАДНОЙ  
ОКРАИНЫ ТИХОГО ОКЕАНА**

Специальность 25.00.10 – геофизика, геофизические методы  
поисков полезных ископаемых

Диссертация на соискание ученой степени  
кандидата физико-математических наук

Научный руководитель –  
доктор физико-математических наук  
Павел Павлович Фирстов

Петропавловск-Камчатский – 2017

## СОДЕРЖАНИЕ

	Стр.
Содержание.....	2
Введение.....	4
Глава 1. Радон – источник информации об изменениях напряженно-деформированного состояния геосреды.....	10
1.1. Общие представления о радоне и механизме его миграции к земной поверхности.....	12
1.2. Предвестники землетрясений в динамике подпочвенного и растворенного в поземных водах радона.....	16
1.3. Некоторые модели формирования радонового предвестника в подземных водах и подпочвенном газе.....	22
Глава 2. Методологическое и аппаратное обеспечение пунктов мониторинга подпочвенных газов на Петропавловск-Камчатском геодинамическом полигоне .....	25
2.1. Расположение пунктов мониторинга концентрации подпочвенных газов на Петропавловск-Камчатском геодинамическом полигоне.....	25
2.2. Аппаратура для регистрации концентрации подпочвенных газов и метеорологических величин .....	29
2.3. Особенности использования газоразрядных счетчиков в качестве датчиков концентрации подпочвенного радона.....	33
2.4. Оснащение пунктов мониторинга подпочвенных газов и строение верхней толщи грунта в районах их расположения.....	35
2.5. Сбор, хранение и обработка временных рядов данных концентрации подпочвенных газов и метеорологических величин .....	44
2.6. Оценка плотности потока радона с поверхности с помощью накопительной камеры.....	46
2.7. Влияние вариаций метеорологических величин на динамику подпочвенного радона.....	50
2.8. Выводы к главе 2.....	57
Глава 3. Динамика поля подпочвенного радона и ее связь с землетрясениями Южной Камчатки и северо-западной окраины Тихого океана.....	59
3.1. Краткосрочные предвестниковые аномалии сильных землетрясений Авачинского залива с магнитудами равными и более 5.5.....	59
3.2. Предвестниковые аномалии перед Жупановским землетрясением с магнитудой 7.2 и глубиной очага 177 км.....	70
3.3. Поведение плотности потока радона в пункте ПРТ во временной окрестности землетрясений с магнитудами более 6 района полуострова Камчатка.....	79
3.4. Удаленные краткосрочные предвестники перед сильными землетрясениями с магнитудами более 7.5 северо-западной окраины Тихого океана.....	90
3.5. Длиннопериодные аномалии в поле подпочвенного радона.....	96
3.6. Выводы к главе 3.....	98
Глава 4. Некоторые закономерности радоновых предвестников землетрясений .....	100
4.1. Зависимость параметров радоновых предвестников от магнитуды землетрясения и расстояния до эпицентра.....	101

4.2. Предвестниковые аномалии землетрясений в подпочвенном радоне, возникающие по механизму полного перемешивания.....	110
4.3. Выводы к главе 4.....	121
Заключение.....	122
Список литературы.....	125
Обозначения и сокращения.....	138
Приложение А. Справка КФ РЭС о представленных заключениях с оценкой сейсмической опасности для Камчатского региона за период 01.01.2016 – 02.06.2017 гг. ....	140
Приложение Б. Заключение о сейсмической опасности для Камчатского края по состоянию на 28 января 2016 г. по данным мониторинга на сети пунктов КФ ЕГС РАН концентрации подпочвенных газов .....	143

## ВВЕДЕНИЕ

### Актуальность работы

Во многих странах, расположенных в сейсмоактивных районах мира (Израиль, Индия, Япония, США, Китай), проводятся работы по исследованию связи динамики радона ( $^{222}\text{Rn}$ ) в различных средах с сейсмичностью и, в частности, с процессами подготовки сильных землетрясений [Уломов, Мавашев, 1967; Барсуков и др., 1985; Абдувалиев и др., 1986; Уткин, Юрков, 1997; Рудаков, 1992, 2009; Спивак и др., 2008; Hatuda, 1953; Virk, Baljinder, 1993; Djefal et al., 1994; Zhan, 1994; Wakita, 1995; Virk et al., 1997; Yasuoka, Shinogi, 1997; Steinitz et al., 2003; Krewski et al., 2005; Yasuoka et al., 2006; Einarsson et al., 2007; Kawada et al., 2007; Firstov et al., 2007; Ramola et al., 2008; Chaudhuri et al., 2010; Barbosa et al., 2015]. Этому способствует простота измерений концентрации  $\text{Rn}$ , а также доступность и сравнительно невысокая стоимость технических средств. Применение радиогенного газа  $\text{Rn}$  обусловлено его химической инертностью и образованием непосредственно в горных породах, откуда он способен мигрировать к дневной поверхности. Длительные ряды наблюдений и сопоставление их с сейсмичностью региона позволяют получить наиболее полную информацию о характере геодинамических процессов. Предвестниковые сигналы подготовки сильных землетрясений могут проявляться в изменениях концентрации  $\text{Rn}$  в почвенном, атмосферном воздухе и в воде. Изучение вариаций  $\text{Rn}$  дает возможность получать информацию о геодинамических процессах, протекающих в горном массиве, и позволяет говорить о свойствах среды, в которой мигрируют почвенные газы [Спивак и др., 2008; Уткин, Юрков, 1997; Фирстов, Макаров, Малышева, 2011; Фирстов, Рудаков, 2003; Virk et al., 1997; Firstov et al., 2007; Ramola et al. 2008; Zhan, 1994; Wakita, 1995; Steinitz et al., 2003]. Полученные результаты дают основание рассматривать возможность использования мониторинга концентрации  $\text{Rn}$  с целью поиска предвестников землетрясений.

Миграция  $\text{Rn}$  в поровом пространстве горных пород происходит благодаря двум основным механизмам транспорта – диффузионного и конвективного, на которые накладывається значительное количество факторов. Геологическая среда является неоднородно-слоистой, с заметно различающимися физико-литологическими характеристиками каждого слоя, что значительно усложняет процесс миграции  $\text{Rn}$  к поверхности. Вариации метеорологических величин (температура и влажность верхнего слоя грунта, атмосферное давление) также весьма существенно влияют на этот процесс и сток  $\text{Rn}$  в атмосферу. В меньшей степени на миграцию  $\text{Rn}$  влияют изменения напряженно-деформированного состояния

геосреды. Полученные результаты наблюдений в сейсмоактивных районах мира дают основание для использования данных мониторинга концентрации подпочвенного  $Rn$  в целях поиска предвестников землетрясений Камчатки и северо-западной окраины Тихого океана, что является важной и актуальной задачей.

### **Цель и задачи работы**

Целью работы является исследование закономерностей динамики объемной активности радона ( $OA Rn$ ) на Петропавловске-Камчатском геодинамическом полигоне и ее отклика на подготовку сильных землетрясений полуострова Камчатка и северо-западной окраины Тихого океана.

Основные задачи работы:

- разработка методики регистрации и мониторинга подпочвенных газов на основе модернизированной сети пунктов Петропавловска-Камчатского геодинамического полигона;
- выявление отклика в динамике подпочвенного радона на геодинамические процессы Курило-Камчатского региона и поиск предвестниковых аномалий сильных землетрясений;
- выбор математических моделей, описывающих механизмы возникновения Камчатских предвестников сильных землетрясений;
- исследование зависимостей параметров предвестников землетрясений от магнитуды.

### **Научная новизна**

Аномалии в динамике объемной активности радона, имеющие характер предвестников землетрясений с магнитудами более 5.5 и глубиной очага менее 90 км впервые зарегистрированы на Камчатке. Впервые на Камчатке удалось в ряде случаев обнаружить возникновение предвестниковых аномалий радона почти одновременно на нескольких пунктах наблюдательной сети. Впервые в мире удалось в ряде случаев обнаружить, что относительные задержки моментов возникновения предвестниковых аномалий радона на пунктах наблюдательной сети имеют систематический характер и могут быть объяснены прохождением через наблюдательную сеть сигнала неизвестной природы, скорость которого составляет 14-144 км/сутки.

Впервые на Дальнем Востоке России был осуществлен краткосрочный прогноз сильного землетрясения с использованием характерных аномалий объемной активности радона и других газохимических аномалий. Аномалии были обнаружены и своевременно проинтерпретированы как предвестниковые за 2 суток до землетрясения с  $M = 7.2$  и глубиной очага  $H = 177$  км, возникшим на эпицентральной расстоянии 100 км от наблюдательной сети. Прогноз оправдался по времени и магнитуде.

**На защиту выносятся следующие положения:**

1. Создана эффективная методика исследования вариаций объемной активности подпочвенного радона на Петропавловск-Камчатском геодинамическом полигоне. Разработан способ оценки плотности потока радона с поверхности при его пассивной регистрации в накопительной камере для оперативного определения чувствительности конкретной точки наблюдений.

2. Выявлены краткосрочные аномалии подпочвенного радона, которые предвещали восемь из двенадцати землетрясений района Авачинского залива с магнитудами более 5.5 и глубинами очагов менее 90 км в 1999-2015 гг. При этом в четырех случаях между временами появления аномалий на 3-5 пунктах имеются характерные относительные сдвиги, которые могут указывать на прохождение по земной среде возмущений типа уединенных волн, источник которых расположен в области эпицентра готовящегося землетрясения.

3. Зарегистрированы и успешно оперативно распознаны в качестве предвестниковых аномалии в поле подпочвенного радона и в концентрации молекулярного водорода, которые предвещали глубокое Жупановское землетрясение с магнитудой 7.2 и глубиной очага 177 км, произошедшее 30 января 2016 г. Оперативная интерпретация позволила дать заблаговременный краткосрочный прогноз названного события, оправдавшийся по времени и магнитуде.

4. Выявлены аномалии концентрации подпочвенного радона, предвещавшие удаленные землетрясения северо-западной окраины Тихого океана с магнитудами более 7.5. Успешно применена теоретическая модель переноса радона в водной среде для объяснения возникновения радоновых аномалий определенного вида.

**Практическая значимость работы**

Исследование связи динамики подпочвенного  $R_n$  с сейсмичностью района Авачинского залива представляет практический интерес для понимания физики процесса подготовки землетрясений и разработки методов краткосрочного прогноза сильных землетрясений. Практическая значимость работы заключается в повышении степени надежности обобщенных по разным видам предвестников оперативных оценок сейсмической опасности и, на этой основе, своевременного информирования органов власти Камчатского края о возможности возникновения сильных землетрясений. Это достигается использованием информации о радоновом предвестнике при составлении еженедельных заключений о сейсмической опасности в Камчатском филиале Российского экспертного Совета по прогнозу землетрясений, оценке сейсмической опасности и риска, направляемых в органы власти и МЧС (приложение А).

Тематика выполненных исследований соответствует приоритетным направлениям фундаментальных исследований в области наук о Земле: Постановление Президиума РАН № 233 от 01.07.2003 г. в части исследований физических полей Земли, а также современной геодинамики, сейсмичности и сейсмического прогноза; программе фундаментальных научных исследований государственных академий наук на 2008–2012 годы по направлению № 64, катастрофические процессы природного и техногенного происхождения, сейсмичность – изучение и прогноз, разработка принципов и систем параметризации природных опасностей, методов мониторинга природных опасностей и системы мониторинга, осуществление комплексного мониторинга, прогнозы времени и магнитуды ожидаемых разрушительных землетрясений, предназначенные для использования органами власти с целью уменьшения ущерба; программе фундаментальных научных исследований государственных академий наук на 2013–2020 годы по направлению № 70, выяснение механизмов преобразования и взаимодействия физических полей Земли на границе земная кора-атмосфера, оценки корреляционных связей вариаций геофизических полей с барическими вариациями в атмосфере; направлению № 78, наземные технологии обнаружения и мониторинга предвестников землетрясений, обоснование и развертывание системы радонового мониторинга в сейсмоактивных районах.

**Достоверность полученных результатов** подтверждается большим объемом материала, используемого в работе, хорошим согласованием моделей и экспериментальных данных, соответствием наблюдений и выводов мировым данным, а так же результатам наблюдений, полученным на Петропавловск-Камчатском геодинамическом полигоне другими исследователями.

### **Апробация работы**

Основные результаты по теме диссертации докладывались на VIII региональной молодежной научной конференции "Исследования в области наук о Земле" (г. Петропавловск-Камчатский, 2010 г.); IX Международной научно-практической конференции студентов, аспирантов и молодых ученых «Геология в развивающемся мире» (г. Пермь, 2011 г.); региональных научно-технических конференциях "Проблемы комплексного геофизического мониторинга Дальнего Востока России" (г. Петропавловск-Камчатский, 2011, 2013 гг.); XII межрегиональной научно-практической конференции «Теория и практика современных гуманитарных и естественных наук» (г. Петропавловск-Камчатский, 2011 г.); IX Международной Крымской научной конференции «Космос и биосфера» (Украина, г. Алушта, 2011 г.); уральских молодежных научных школах по геофизике (г. Екатеринбург, г. Пермь,

2012, 2013, 2014, 2015 гг.); ежегодных региональных научных конференциях, посвященных Дню вулканолога "Вулканизм и связанные с ним процессы" (г. Петропавловск-Камчатский, 2013, 2014, 2017 гг.); VI международной конференции "Солнечно-земные связи и физика предвестников землетрясений", пос. Паратунка, 2013 г.); Международной конференции "Современные информационные технологии для фундаментальных научных исследований в области наук о Земле" (г. Петропавловск-Камчатский, 2014 г.); Восьмом Международном совещании "Japan-Kamchatka-Alaska Subduction Processes" (г. Саппоро, Япония, 2014 г.); Всероссийской научной конференции с международным участием "Геодинамические процессы и природные катастрофы. Опыт Нефтегорска" (г. Южно-Сахалинск, 2015 г.); VI Сахалинской молодежной научной школе "Природные катастрофы: изучение, мониторинг, прогноз" (г. Южно-Сахалинск, 2016 г.).

Исследования, положенные в основу некоторых глав диссертации, выполнены при финансовой поддержке РФФИ, гранты № 12-05-31319/12 (мол\_а), № 16-05-00162/16 (а).

#### **Авторский вклад**

В коллективных исследованиях по изучению динамики подпочвенных газов и ее связи с сейсмичностью автор участвует с 2010 г., работая в лаборатории акустического и радонового мониторинга КФ ФИЦ ЕГС РАН под руководством д.ф.-м.н. П.П. Фирстова. Автором выполнены работы по модернизации сети с целью автоматизации сбора информации, а также внедрены современные программные средства обработки данных, получаемых с сети пунктов мониторинга подпочвенных газов. Диссертантом разработана методика оценки плотности потока радона с земной поверхности методом пассивной регистрации с помощью накопительной камеры и выполнено описание одного из типов зарегистрированных предвестников в концентрации подпочвенного радона на основании математической модели распространения радона в потоке воды. Диссертант принимал активное личное участие в анализе результатов регистрации подпочвенных газов, лично проводил в ретроспективном режиме выделение аномалий по сети в целом, устанавливал типичный облик предвестниковых аномалий, принимал личное участие в оперативном анализе текущих данных и выработке решений о квалификации их в качестве предвестниковых.

#### **Соответствие диссертации паспорту научной специальности**

Направление диссертационной работы, результатов и публикаций соответствует паспорту специальности 25.00.10 «Геофизика, геофизические методы поисков полезных ископаемых», пунктам: 4. исследование природы, свойств и геодинамической интерпретация деформационных характеристик и естественных геофизических полей. Взаимодействие

деформационных и геофизических полей; 5. геофизические проявления напряженного состояния недр и оценка напряженного состояния по геофизическим данным; 6. математическое моделирование геодинамических процессов любых пространственных и временных масштабов.

### **Публикации**

По теме диссертационной работы опубликовано 30 статей, в том числе 10 статей в ведущих научных рецензируемых журналах, входящих в перечень ВАК. Материалы работы использованы для написания четырех научных отчетов.

### **Объем и структура работы**

Диссертация состоит из введения, четырех глав, заключения, списка литературы и двух приложений. Основное содержание работы изложено на 139 страницах. Список литературы включает в себя 129 наименования, в том числе 40 на иностранных языках. Текст содержит 62 рисунка и 8 таблиц.

### **Благодарности**

Автор выражает искреннюю признательность научному руководителю, д.ф.-м.н. П.П. Фирстову за его высокопрофессиональное руководство при выполнении работы, постоянное внимание к научной деятельности и помощь при проведении исследований и подготовке диссертации. Автор благодарен соавторам публикаций, в сотрудничестве с которыми был получен ряд интересных научных результатов: Р.Р. Акбашеву, И.П. Глухой, В.В. Исакевичу, Д.В. Исакевичу, Е.Р. Махмудову, П.М. Нагорскому, С.С. Сероветникову, В.А. Широкову, Р.И. Паровику. С большим удовлетворением автор отмечает четкую работу сотрудников лаборатории акустического и радонового мониторинга В.Н. Волошина и Ю.А. Владимирова по профессиональному обслуживанию аппаратуры на пунктах мониторинга. Автор выражает признательность безвременно ушедшему директору КФ ГС РАН, где проводились исследования в течение многих лет, к.т.н. В.Н. Чеброву за поддержку работ по мониторингу поля подпочвенного радона.

Автор благодарит свою жену за понимание и поддержку.

## ГЛАВА 1. РАДОН – ИСТОЧНИК ИНФОРМАЦИИ ОБ ИЗМЕНЕНИЯХ НАПРЯЖЕННО-ДЕФОРМИРОВАННОГО СОСТОЯНИЯ ГЕОСРЕДЫ

Первые работы по исследованию радиоактивного газа радона ( $^{222}\text{Rn}$ ) в почвенном воздухе и грунтовых водах были начаты для поиска месторождений радиоактивных руд. В дальнейшем с этой целью был разработан эманационный метод, в основе которого лежит процесс массопереноса  $^{222}\text{Rn}$ , который является продуктом распада радия ( $^{226}\text{Ra}$ ), в грунте под действием механизмов диффузии и конвекции. Для теоретического обоснования эманационного метода в середине прошлого века была разработана математическая модель диффузионно-конвективного переноса Rn в грунте, ставшая классической, и широко применяющаяся в различных областях знаний. В России этой проблемой занимались многие исследователи [Граммаков, 1934; Grammakov, 1936; Булашевич, Хайритдинов, 1959; Новиков, Капков, 1965; Новиков, 1989].

Идея о возможности изменения химического состава подземных вод и подпочвенного газа перед землетрясениями впервые была высказана в начале XX века основоположником русской сейсмологии Б.Б. Голицыным. Но бурное развитие эта идея получила после Ташкентского землетрясения 26 апреля 1966 г. с  $M = 5.2$ , когда ретроспективно была выявлена изменчивость динамики химического и газового состава подземных вод и обнаружены геохимические аномалии, предшествующие землетрясениям [Уломов., Мавашев, 1967]. Основному толчку афтершоковой последовательности предшествовало закономерное изменение в динамике объемной активности радона (ОА Rn), на основании чего были сделаны успешные прогнозы его наиболее сильных афтершоков. По-видимому, столь блестящий результат был связан с тем, что измерения ОА Rn проводились в воде глубокой скважины, пробуренной практически в эпицентре землетрясения. Совпадение пункта регистрации с эпицентром землетрясения является уникальным случаем и вероятность такого повторения весьма мала. После этого началось бурное развитие геохимических и гидрогеодинамических методов прогноза землетрясений в СССР [Барсуков и др., 1985; Абдувалиев и др., 1986] и в других странах.

Исторически, в связи с ядерными взрывами на территории Японии и ее высокой сейсмичностью, большую заинтересованность к поиску радоновых предвестников землетрясений проявляли японские исследователи. Регистрация концентрации Rn осуществлялась: в подпочвенном воздухе [Natuda, 1953; Kawada et al., 2007], растворенном в геотермальных водах [Wakita, 1995] и в воздухе приземного слоя атмосферы [Yasuoka, Shinogi, 1997; Yasuoka et al., 2006].

Большой объем работ по мониторингу подпочвенного Rn в течение несколько лет был проведен американскими исследователями вдоль известных своей сейсмичностью разломов земной коры: Сан-Андреас, Хейвард, Калаверас [King et al., 1996; Krewski et al., 2005]. Наблюдательная сеть состояла из 60 пунктов, покрывающих значительную площадь. Наличие большого объема данных по исследуемой площади позволило в ретроспективе построить карты динамического изменения концентрации Rn перед землетрясениями с  $M > 5$ . В работе [Krewski et al., 2005] было показано, что за 90–100 дней перед землетрясениями в радиусе 28–30 км от эпицентра регистрировалось снижение концентрации Rn, а на большем удалении от эпицентров наблюдалось увеличение концентрации Rn. По мнению авторов, это свидетельствовало о консолидации геоматериала в очаговой области с появлением напряжений сжатия на последней стадии подготовки землетрясения.

В настоящее время в геофизике развивается представление о геологической среде как иерархически самоподобной открытой неравновесной системе отдельностей, в которой сейсмический процесс является следствием деформирования среды под действием тектонических сил. Накапливаемая в структурных объемах такой среды при ее деформировании потенциальная энергия диссипирует, в основном, на системах разломов и блоков различного масштабного уровня. Предполагается, что предвестниковые аномалии могут иметь деформационную природу и способны опосредованно проявляться в различных геофизических полях, в том числе и в поле подпочвенного и растворенного в подземных водах Rn.

Так как в геохимических исследованиях с целью прогноза землетрясений наиболее технологичным методом является регистрация Rn, то поиски связи между его содержанием в подпочвенном воздухе и растворенном в подземных водах и изменениями напряженно-деформированного состояния геосреды перед землетрясениями, усиленно ведутся во всех сейсмоактивных регионах Земли, начиная с 70-х годов XX века. После некоторого спада интереса к этому методу, с середины 80-х годов наблюдался новый всплеск работ, связанных с изучением сейсмозманационных эффектов геологических структур во многих регионах мира [Горбушина и др., 1972; Абдуалиев и др., 1986; Рудаков, 1992, 2009; Соболев, 1993; Спивак и др., 2008; Уткин, Юрков, 1997; Фирстов, Макаров, Малышева, 2011; Фирстов, Рудаков, 2003; Virk, Baljinder, 1993; Virk et al., 1997; Shengelaia et al., 2002; Chaudhuri et al. 2010; Djefal et al., 1994; Firstov et al., 2007; King et al., 2006; Ramola et al. 2008; Zhan, 1994; Wakita, 1995; Steinitz et al., 2003; Ondoh, 2009]. Это было связано с тем, что в связи с мировым прогрессом и внедрением персональных компьютеров, аппаратные возможности и методы обработки достигли нового качественного уровня и стали более доступны. Кроме того, бурному развитию радонового метода способствовали технологичность регистрации Rn, а также доступность и

сравнительно невысокая цена технических средств. Поиск предвестниковых аномалий в динамике Rn ведется в подпочвенном и атмосферном воздухе, а также в подземных водах.

Перспективность сейсмоэманационного метода с целью мониторинга геодинамических процессов, в частности, прогноза землетрясений и горных ударов показана в многочисленных работах, ссылки на которые можно найти в обзорах [Зубков, 1981; Dubinchuk, 1991; Toutain, Baubron, 1999; Cicerone et al., 2009].

### 1.1. Общие представления о радоне и механизме его миграции к земной поверхности

Природные радионуклиды  $^{238}\text{U}$ ,  $^{235}\text{U}$ ,  $^{232}\text{Th}$  испытывают сложные превращения, образуя длинные цепочки относительно короткоживущих продуктов распада, и в итоге превращаются в стабильные дочерние продукты. Урановый, актиноурановый и ториевый ряды включают 15–18 членов. Построение рядов определяется тем, что при испускании  $\alpha$ -частицы массовое число  $A$  образующегося нуклида уменьшается на 4, а атомный номер  $Z$  – на 2 единицы, при испускании  $\beta$ -частицы значение  $A$  практически не меняется,  $Z$  увеличивается на 1.

Все три природных ряда содержат в середине по одному изотопу единственного радиоактивного газа – радона. Он делит ряды на две части. Первые отрезки рядов содержат долгоживущие радионуклиды; конечные отрезки состоят из короткоживущих для данных рядов изотопов. Родоначалник ряда  $^{238}\text{U}$  составляет 99.2739% от общего количества природного U. Конечный член ряда – радиогенный изотоп свинца  $^{206}\text{Pb}$  [Новиков, 1989].

На рисунке 1.1 показана схема превращения радиевой группы уранового ( $^{238}\text{U}$ ) ряда. В процессе превращений дочерних элементов  $^{238}\text{U}$  в ряду появляется  $^{226}\text{Ra}$ , продуктом распада которого является газообразный радионуклид  $^{222}\text{Rn}$  с периодом полураспада 3.825 дня. В результате распада  $^{222}\text{Rn}$  образуются радиоактивные короткоживущие изотопы полония (RaA, RaC), свинца (RaB) и висмута (RaC').

Распад  $^{222}\text{Rn}$  и его короткоживущих дочерних продуктов происходит с выделением всех трех видов излучения, по которым можно проводить измерение его концентрации. Как правило, прямые измерения проводятся по  $\alpha$ -излучению с помощью сцинтилляционных детекторов. Энергия  $\alpha$ -частиц при распаде нуклидов уранового ряда находится в диапазоне 4.1–7.7 МэВ, причем значение  $E_\alpha$  тем больше, чем меньше продолжительность жизни нуклида. Косвенно Rn можно регистрировать по продуктам распада RaC и RaB по  $\beta$ -излучению с помощью газоразрядных счетчиков. Значение  $E_{\max}$  верхних границ  $\beta$ -спектра, в отличие от  $\alpha$ -излучения, изменяется в широких пределах, от 14 кэВ до 3.2 МэВ. В этом случае, как было показано в

работе [Рудаков, 1992], процесс измерения концентрации Rn хорошо поддается автоматизации. В некоторых случаях мониторинг концентрации Rn в подпочвенном воздухе осуществляется по  $\gamma$ -излучению.

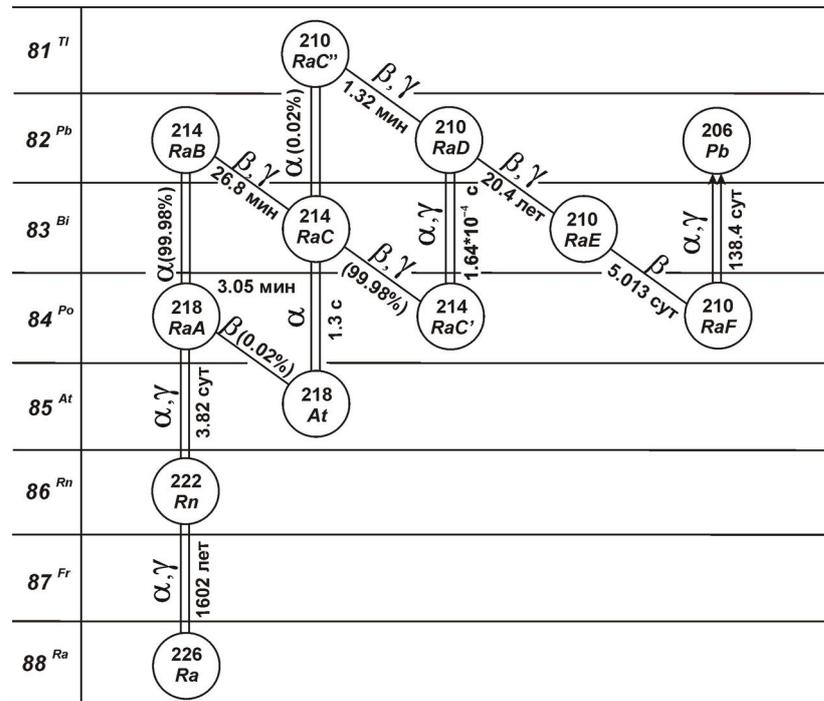


Рисунок 1.1 – Схема превращений радиевой группы уранового ряда радиоактивных изотопов [Новиков, 1989].

Согласно классическому представлению, сложившемуся в теории эманационного метода, выделяются четыре этапа переноса Rn в системе «грунт–атмосфера» [Новиков, 1989; Рудаков, 1992]:

- происходит непрерывное выделение Rn из кристаллической решётки радийсодержащих минералов с концентрацией радия ( $q_{Ra}$ ) в мелкие поры грунта, при этом количество высвобождающегося Rn характеризуется коэффициентом эманирования ( $K_{эм}$ );
- на втором этапе молекулярное диффузионное движение Rn происходит в мелких порах грунта до тех пор, пока он не попадает в более крупные поры, в которых уже может иметь место конвекция;
- третий этап процесса характеризуется диффузионно-конвективным переносом Rn по крупным порам и трещинам к дневной поверхности с последующим стоком в атмосферу;
- в приземном слое атмосферы роль молекулярной диффузии падает и возрастает роль турбулентной диффузии, обусловленная градиентом температуры приземной атмосферы, скоростью и направлением ветра.

Схематически процесс миграции Rn в системе «грунт-атмосфера» показан на рисунке 1.2. Молекулярная диффузия обеспечивает распространение в поровом пространстве грунта

молекул газа, уравнивает концентрацию  $R_n$  во всех частях объёма геосреды. За счет адвекции осуществляется вертикальное перемещение молекул газа по порам в результате теплообмена (конвекция) и изменении литостатического давления (фильтрация).

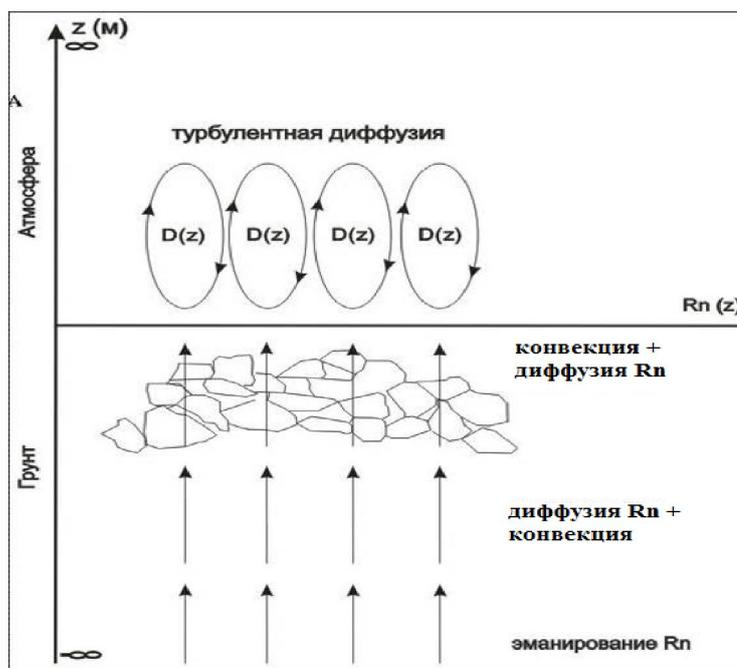


Рисунок 1.2 – Обобщенная схема переноса радона в системе «грунт-атмосфера» с помощью механизмов диффузии, адвекции и турбулентной диффузии.

В настоящее время признается большая роль миграции почвенных газов за счет всплытия микропузырей (тория «геогаза») в зоне полного влагонасыщения [Varhegyi et al., 1986; Бондаренко, Иванова, 1999, Етиопе, Martinelli, 2002]. Таким образом, на процесс миграции  $R_n$  в рыхлых отложениях основное влияние оказывает проницаемость. Она зависит от свойств и строения верхней толщ грунта, а также наличия водоносного горизонта и изменений напряженно-деформированного состояния блока геосреды в районе пункта регистрации.

Теоретически показано [Рудаков, 1992], что реакцией зоны насыщения тектонического нарушения на изменения напряженно-деформированного состояния земной коры будет изменение уровня поверхности открытого водоносного горизонта, которое также будет функционально зависеть от вариаций атмосферного давления. Следуя этой логике, динамика поля радона в зоне аэрации (подпочвенного радона) в основном определяется вышеуказанными причинами.

Проанализируем параметры дифференциального уравнения массопереноса подпочвенного радона с позиции динамики среды. Классическая теория эманационного метода рассматривает массоперенос радона в рыхлых отложениях как некий установившийся

диффузионно-конвективный процесс, который описывается следующим уравнением [Новиков, Капков, 1965; Фирстов, Рудаков, 2003]:

$$\eta \frac{dRn}{dt} = D \frac{d^2 Rn}{dx^2} + v\eta \frac{dRn}{dx} - \eta Rn\lambda + Q, \quad (1.1)$$

где  $Rn$  – концентрация радона в единице объема порового пространства, Ки/см<sup>3</sup>;  $\eta$  – коэффициент пористости среды;  $D$  – коэффициент диффузии, см<sup>2</sup>/с;  $\lambda$  – постоянная распада эманаций, с<sup>-1</sup>;  $v$  – скорость конвективного переноса, см/с;  $Q = \frac{a \cdot Ra \cdot \rho \cdot \lambda}{\eta}$  – скорость выделения эманаций в поровое пространство в единице объема среды, Ки·с/см<sup>3</sup>;  $Ra$  – количество радия в породе, г;  $\rho$  – плотность породы, г/см<sup>3</sup>;  $a$  – коэффициент эманирования.

Если при проведении площадного эманационного картирования параметры  $D$ ,  $v$  и  $Q$ , как правило, принимаются константами и зависят от петрологических особенностей пород, то при переносе радона в условиях зоны аэрации при длительном периоде наблюдений они могут изменяться под действием метеорологических факторов и геодинамических процессов [Фирстов, Рудаков, 2003].

Коэффициент диффузии ( $D$ ) функционально зависит от влажности и температуры рыхлых отложений. Суточные и особенно сезонные колебания температуры приземного слоя атмосферы определяют соответствующую цикличность колебаний температуры верхних слоев поверхности Земли. Зависимость коэффициента диффузии от температуры рыхлых отложений в соответствии с кинетической теорией газов оценивается соотношением:

$$D = D_0 (T^k / 273)^\alpha, \quad (1.2)$$

где  $T^k$  – температура по шкале Кельвина;  $D_0$  – коэффициент диффузии при нормальных условиях;  $\alpha$  – некоторый показатель степени, значения которого часто принимаются равным 0.5. Существенное влияние на скорость диффузии оказывает влажность. При увеличении влажности скорость диффузии резко уменьшается и при полном увлажнении диффузия практически прекращается. По данным [Новиков, 1989], при влажности пород до 6% коэффициент диффузии меняется не существенно (в пределах  $(6 \div 7) \cdot 10^{-2}$  см<sup>2</sup>/с); при влажности до 15% составляет  $10^{-2}$  см<sup>2</sup>/с; а при влажности 17% уже составляет  $5 \cdot 10^{-3}$  см<sup>2</sup>/с. При полном увлажнении (20÷25%) коэффициент диффузии достигает величины, характерной для диффузии эманации в воде  $\sim 10^{-5}$  см<sup>2</sup>/с.

Скорость конвективного переноса ( $v$ ) обусловлена движением газовых потоков под действием перепада давления, который определяется атмосферным давлением и уровнем открытой поверхности зоны насыщения. По данным [Рудаков, 1992] скорость конвективного переноса в проницаемых тектонических нарушениях, связанная с «падением» уровня открытой

поверхности зоны насыщения («засасыванием»), меняется в пределах  $(1.5 \div 6.2) \cdot 10^{-6}$  м/с ( $13 \div 54$  см/сутки), что близко к скорости конвективного переноса эманации в естественном залегании [Новиков, 1989].

Скорость радоновыделения ( $Q$ ) зависит от содержания в породах радия и их плотности и пористости, а также эманационной способности (коэффициента эманирования). Временная изменчивость скорости радоновыделения прежде всего определяется коэффициентом эманирования и пористостью пород. Оба параметра при прочих равных условиях определяются вариациями влажности, которая влияет на выход эманаций в поровое пространство и его объем. Также эманационная способность радиоактивных составляющих рыхлых отложений зависит от температуры, что определяет сезонные вариации в поле подпочвенного радона.

## **1.2. Предвестники землетрясений в динамике подпочвенного и растворенного в подземных водах радона**

В ряде обзорных работ, где собраны и систематизированы многочисленные данные о радоновых предвестниках, описываются аномалии со временем упреждения ( $t_{упр}$ ) от часов до нескольких лет. Под временем упреждения понимается время между моментом возникновения предвестника и событием. Этот термин является эквивалентом термина «длительность предвестника», использовавшегося в работах конца прошлого века [Добровольский, 1991; Сидорин, 1992]. Хотя, строго говоря, термин «время упреждения» определяется как промежуток времени от настоящего в будущее, на который разрабатывается прогноз [Прогностика. Терминология, 1990], а в случае появления предвестника прогноз можно сделать только после его формирования. В диссертации, вслед за другими исследователями, используется этот термин для интервала: *начало формирования предвестника – событие*.

В работе более чем тридцатилетней давности [Chang, Lin, 1979] по данным за десятилетний период наблюдений на территории Китайской народной республики выделены 4 типа радоновых предвестников с различными временами упреждения: долгосрочные (несколько лет), среднесрочные (около года), краткосрочные (2-6 месяцев), оперативные (часы-сутки).

В работе [Зубков, 1981] сделан анализ 79 известных на то время радоновых предвестников, зарегистрированных в различных сейсмоактивных районах мира к концу 80-х годов прошлого века: 28 в Средней Азии на территории СССР, 15 в Китае, 4 на Кавказе, 32 в Северной Америке (США). Обращено внимание на их временные формы и найдены

эмпирические зависимости между параметрами предвестниковых аномалий (амплитуда, время упреждения) и параметрами землетрясений (магнитуда, расстояние).

В обзорной работе, выполненной спустя десять лет [Dubinchuk, 1991], обращается внимание на особенности радоновых аномалий и сделана попытка объяснения их физической природы. Данная работа, написанная около четверти века назад, и сегодня не потеряла своей актуальности. В работе отмечается, что радоновые предвестники имеют большое многообразие форм различной длительности, и они регистрируются на значительных расстояниях от эпицентров, как мелких, так и глубоких землетрясений с диапазоном магнитуд  $M = 4-8$ . В своей работе автор [Dubinchuk, 1991] предположил, что наблюдаемые аномалии Rn могут возникать при небольших деформациях ( $10^{-6} \div 10^{-8}$ ), связанных с изменениями напряженно-деформированного состояния геосреды в пункте наблюдения.

В работе [Cicerone et al., 2009] анализ радоновых предвестников выполнен на более широком материале. Приводятся данные о предвестниках в радоновом поле перед землетрясениями с  $M = 2.5-8$ . Большинство наблюдений было проведено перед землетрясениями с  $M > 4$ . Относительные изменения концентрации Rn чаще всего находились в пределах 20–200 % от фона, но отмечены случаи превышения более чем на 1200 %. В работе исследованы эмпирические зависимости между амплитудой предвестниковой аномалии от магнитуды землетрясения и расстоянием до очага землетрясения, а также зависимости длительности предвестниковой аномалии и времени упреждения от магнитуды.

По морфологическим признакам в концентрации Rn исследователями выделяются аномалии: импульсные и ступенчатые с длительностью аномалии ( $t_{ан}$ ) до 5 суток; бухтообразные, положительной и отрицательной полярности с  $t_{ан}$  от 5 до 50 суток; имеющие характер тренда, часто продолжающиеся после землетрясения с  $t_{ан}$  более 50 суток.

Согласно [Прогностика. Терминология, 1990] принято считать, что *оперативный, краткосрочный, среднесрочный и долгосрочный* прогнозы имеют время упреждения  $t_{упр}$  соответственно до одного месяца, от месяца до одного года, от года до пяти лет, от пяти лет до 15 соответственно. В связи с ограниченной выборкой предвестниковых аномалий, в диссертации по времени упреждения принята следующая градация: оперативные и краткосрочные предвестники имеют время упреждения  $t_{упр} \leq 10$  суток, среднесрочные  $10 < t_{упр} < 100$  суток, а долгосрочные  $t_{упр} > 100$  суток.

Примеры краткосрочных предвестников в поле Rn. Хорошо выраженные краткосрочные предвестники перед землетрясениями с  $M > 7$ , произошедшими в провинции Сичуань (Sichuan, Китай), зарегистрированы в ОА Rn в подземных водах [Teng, 1980]. За 6 суток перед землетрясением с  $M = 7.9$  в Лухуо (Luhuo) выделяется бухтообразная аномалия длительностью трое суток (в связи с дискретизацией одни сутки, она выглядит «импульсной»). Подобная

аномалия наблюдалась за 8 суток и перед землетрясением Суньпань-Пинью (Songpan-Pingwu) с  $M = 7.2$ . Относительная амплитуда ( $\delta = ((A_A - A_\Phi) / A_\Phi) \cdot 100\%$ ) обеих аномалий составляла  $\sim 200\%$  от фона (рисунок 1.3а,б).

Возникновение аномалий в поле подпочвенного Rn, как правило, связывают с изменением напряженно-деформированного состояния геосреды в пункте регистрации. Это хорошо иллюстрирует аномалия с  $t_{\text{упр}} = 8$  сут и длительностью около трех суток, зарегистрированная перед землетрясением с  $M = 5.6$ , произошедшем 15.10.2012 г. в зоне субдукции в районе полуострова Камчатка (140 км от пункта регистрации), и коррелирующая с деформацией земной поверхности на Петропавловск-Камчатском геодинамическом полигоне (рисунок 1.3в,г) [Фирстов, Макаров, Сероветников, 2013; Макаров, Сероветников, 2014].

Синхронно с радоновой аномалией, наклономерной станцией было зарегистрирована деформация земной поверхности, по форме представляющая уединенную волну длительностью  $\sim 4$  суток. Максимальная относительная деформация грунта оценивается  $2 \cdot 10^{-6}$  [Макаров, Сероветников, 2014].

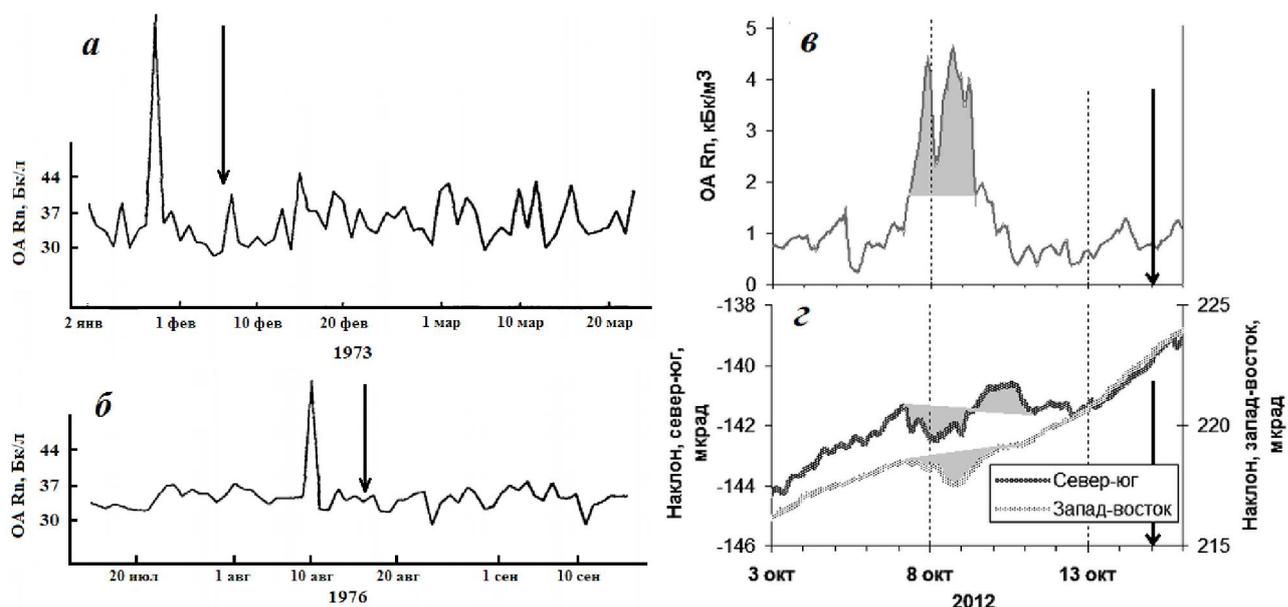


Рисунок 1.3 – Динамика ОА Rn в подземных водах перед землетрясениями Лухуо (а) (Китай,  $M=7.9$ ) и Суньпань-Пинью (б) (Китай,  $M=7.2$ ) [Teng, 1980]; динамика ОА Rn (в) и кривые наклонов двух составляющих перед землетрясением зоны субдукции (г) (Камчатка,  $M = 5.6$ ) [Макаров, Сероветников, 2014].

Примеры среднесрочных и долгосрочных предвестников. Впервые радоновый предвестник был зарегистрирован в подпочвенном воздухе разломной зоны перед землетрясением с  $M = 8$ , произошедшим 12.12.1944 г. в районе Тонанкай (Tonankai, Япония) [Natuda, 1953]. В последние десятилетия прошлого века, работы по поиску предвестников в радоновом поле в Японии

приобрели масштабный характер. Так, перед разрушительным землетрясением Идзу-Осима (Izu Oshima) в Японии 14.01.1978 г. с  $M=7.0$  на расстоянии 30 км от эпицентра в течение 2.5 месяцев [Wakita, 1981] наблюдались синхронные предвестниковые аномалии в концентрации почвенного Rn и относительных деформациях земной поверхности (рисунок 1.4а, б).

Аномалии Rn были зафиксированы перед землетрясением с  $M=6.8$  в префектуре Нагано 14 сентября 1984 г. Особенностью этой предвестниковой аномалии было то, что за три месяца до этого землетрясения наблюдалось постепенное увеличение ОА Rn, с резким «пиковым» выбросом за две недели до события [Hirota et al., 1988].

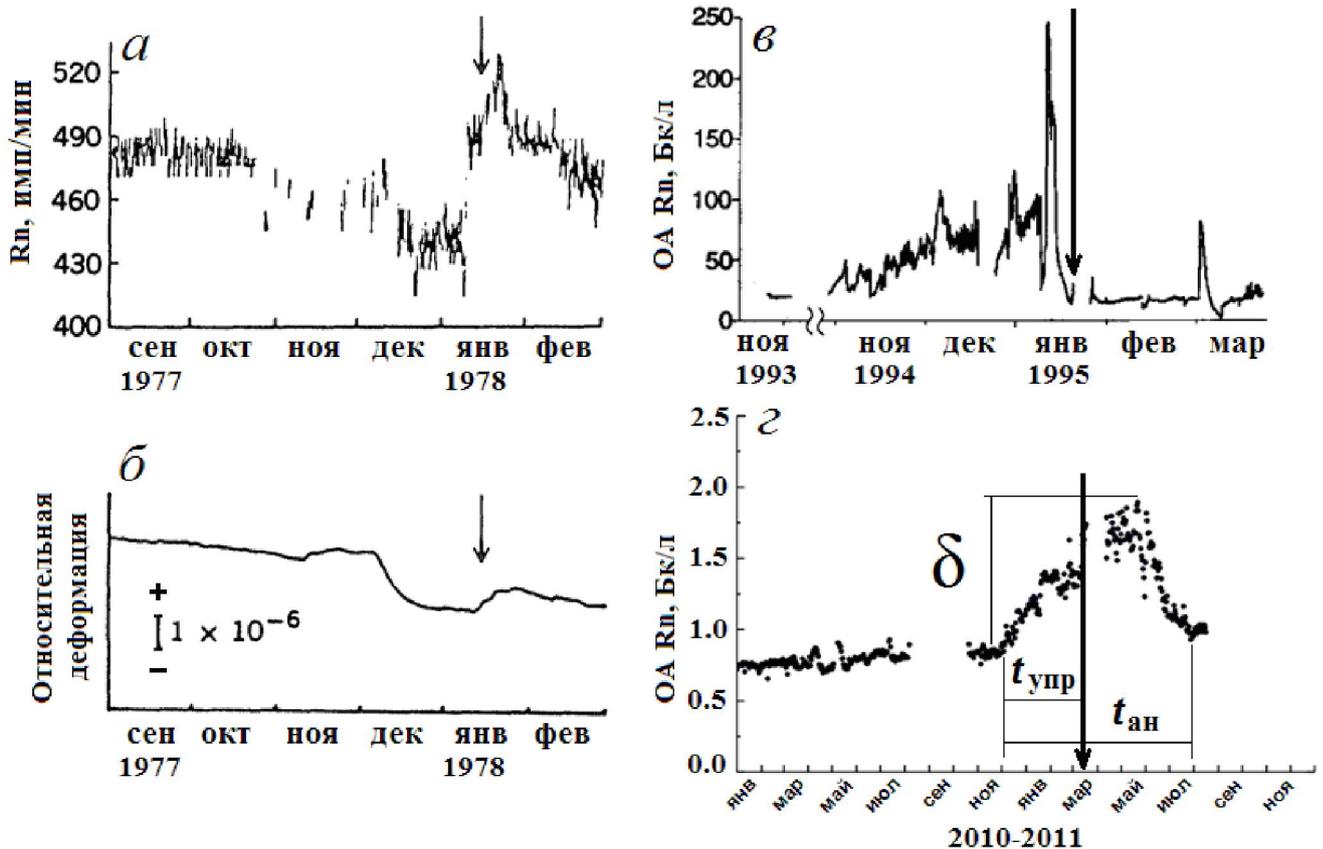


Рисунок 1.4. Концентрация Rn (а) и деформация земной поверхности (б) перед землетрясением Идзу-Осима 14.01.1978 г.,  $M=7.0$  [Wakita, 1981]; динамика ОА Rn в скважине (в) перед землетрясением Кобе (Япония) 17.01.1995 г.,  $M=7.2$  [Igarashi et al., 1995]; динамика ОА Rn, растворенного в грунтовых водах (з) перед землетрясением Тохоку 11.03.2011 г.,  $M=9.0$  [Tsunomori et al., 2011]. Стрелкой показан момент возникновения землетрясения.

В течение примерно двадцати лет Токийским университетом и Геологической службой Японии с целью прогноза землетрясений в восточной части Японии проводились исследования в пунктах мониторинга растворенного в грунтовых водах Rn. На рисунке 1.4в приведена аномалия перед землетрясением в Кобе (Kobe) 17.01.1995 г.,  $M=7.2$  [Igarashi et al., 1995]. Измерение Rn осуществлялось в скважине на глубине 17 м на расстоянии 30 км от очага землетрясения.

Уровень ОА Rn составлял 20 Бк/л до октября 1994 г., после чего началось плавное возрастание, которое достигло 60 Бк/л к ноябрю 1994 г. Кратковременное «пиковое» увеличение Rn зарегистрировано с 7 по 10 января 1995 г. После чего произошло резкое снижение за 7 дней до землетрясения с  $M = 7.2$ . После землетрясения, начиная с 22 января, значение ОА Rn вернулось к фоновому уровню. Кроме того, в приземном слое атмосферы также была зарегистрирована аномалия, что объяснялось повышенным стоком Rn через разломные зоны в атмосферу [Yasuoka, Shinogi, 1997; Yasuoka et al., 2006].

В Японии вблизи северо-восточного побережья о. Хонсю 11 марта 2011 г. произошло самое мощное за всю историю наблюдений мегаземлетрясение Тохоку с  $M = 9.0$ , следствием которого стали большой материальный ущерб и людские потери. В работе [Tsunomogi et al., 2011] приведены данные с января 2010 г. по ноябрь 2011 г. измерений Rn, растворенного в водах артезианской скважины глубиной 350 м, в центральной части полуострова Идзу, на расстоянии 490 км от эпицентра (рисунок 1.4z). За 4.5 мес. началось возрастание ОА Rn с относительной амплитудой на момент землетрясения  $\delta \approx 100\%$ . Только в июле ОА Rn упала до фона, общая длительность аномалии составила  $t_{ан} = 8$  мес.

Перед этим мегаземлетрясением в поле подпочвенного Rn на Петропавловск-Камчатском геодинамическом полигоне отмечались как среднесрочная, так и долгосрочная аномалии (рисунок 1.5, 1.6). Бухтообразная среднесрочная аномалия длительностью 12 суток наблюдалась в пункте ИНС. В этом пункте регистрация концентрации Rn ведется четырьмя газоразрядными счетчиками: на поверхности пола бункера, глубиной 2.5 м; в зоне аэрации, на глубине 1 м от пола бункера; в воздухе бункера; в обсадной трубе скважины. На всех датчиках четко выделяется аномалия (рисунок 1.5), которая рассматривается как предвестник мегаземлетрясения Тохоку с  $t_{упр} = 28$  суток [Макаров и др., 2012; Широков, Фирстов, Макаров и др., 2014].

Долгосрочные аномалии в виде *трендов* в динамике подпочвенного Rn в пункте ПРТ наблюдались перед цепочкой сильных землетрясений северо-западного обрамления Тихого океана и мегаземлетрясением Тохоку. Тренд роста значений ОА Rn в пункте ПРТ перед мегаземлетрясением начался в марте 2010 г. и продолжался 8 месяцев до января 2011 г. (рисунок 1.6). Перед цепочкой землетрясений с  $M > 7.5$  Курило-Камчатской островной дуги наблюдался устойчивый тренд роста ОА Rn длительностью более двух лет с последующим резким падением непосредственно перед событиями. В настоящее время также наблюдается тренд, сменившийся резким падением с  $\delta = 30\%$ , который рассматривается как долгосрочный предвестник землетрясения с  $M > 7.5$  в районе южная Камчатка – северные острова Курильской гряды [Фирстов, 2014; Фирстов, Макаров, 2015].

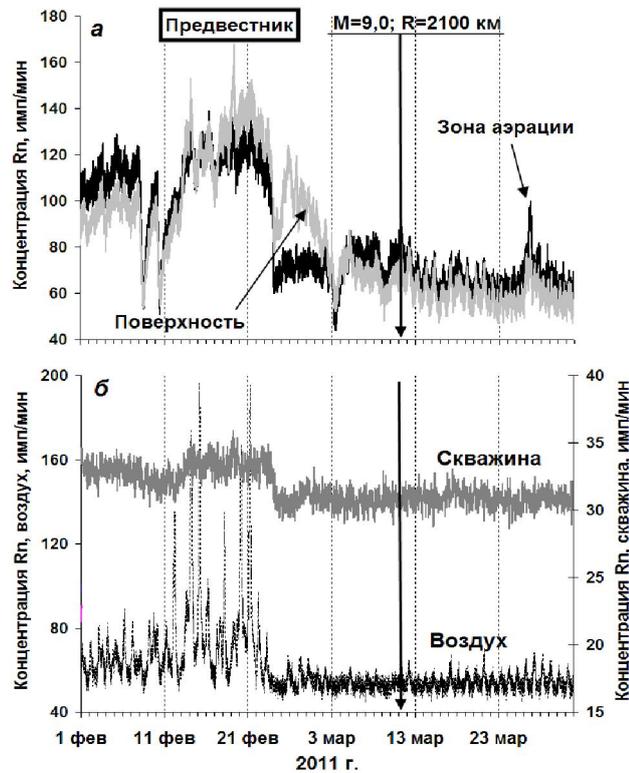


Рисунок 1.5 – Динамика концентрации  $R_n$  на Петропавловск - Камчатском геодинамическом полигоне за период февраль–апрель 2011 г. в пункте ИНС: *а* – концентрация  $R_n$  в зоне аэрации и с поверхности пола бункера; *б* – концентрация  $R_n$  в воздухе бункера и в стволе скважины. Подробное описание системы наблюдений пункта ИНС дано в Главе 2.

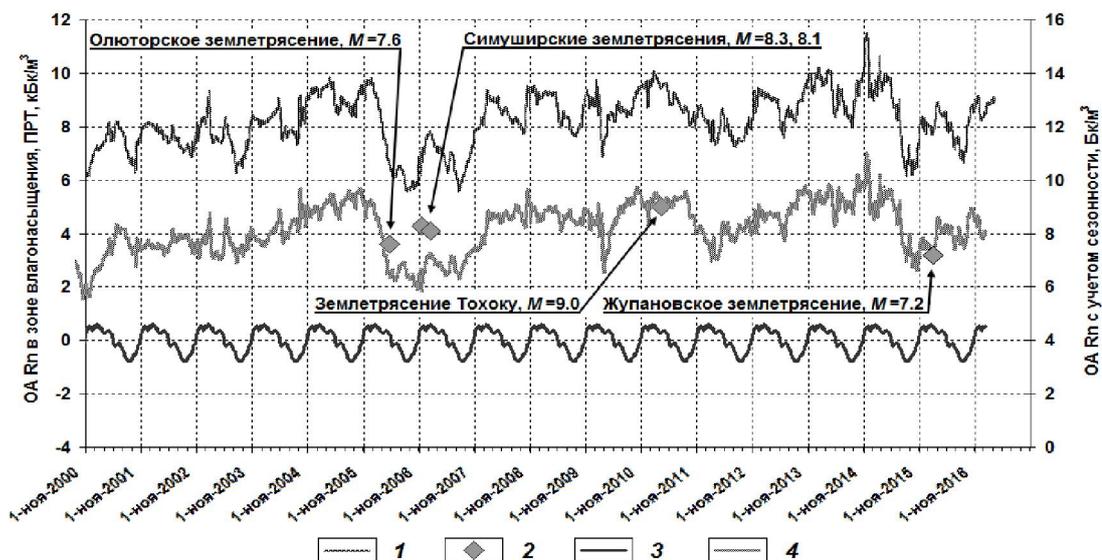


Рисунок 1.6 – Временной ряд  $OA R_n$  в зоне влагонасыщения (глубина 3.5 м) в опорном пункте ПРТ, осредненный скользящим средним в пяти суточном окне, аддитивная сезонная модель и кривая за вычетом сезонной составляющей: *1* – осредненные данные, *2* – землетрясения северо-западного обрамления Тихого океана с  $M > 7.5$  и Жупановское землетрясение с  $M = 7.2$ , *3* – аддитивная сезонная модель, *4* – кривая  $OA R_n$  за вычетом сезонной составляющей [Фирстов, Макаров, 2015].

### 1.3. Некоторые модели формирования радонового предвестника в подземных водах и подпочвенном газе

До настоящего времени механизм возникновения вариаций ОА Rn в подземных водах и подпочвенном воздухе полностью не понят и не описан достаточно ясно для интерпретации наблюдаемых предвестниковых аномалий в координатах пространство – время – напряжение геосреды, с целью прогноза землетрясений.

Перечислим некоторые известные модели формирования радоновых предвестников в подземных водах и подпочвенном газе [Фирстов, Макаров, 2015].

1. Модели формирования радоновых предвестников на основе механических представлений:

- деформации, способствующие выжиманию радона из кристаллической решетки и увеличению коэффициента эманирования Rn из горных пород в поровые флюиды;
- подмешивание флюидов в подземные воды из других горизонтов [Гудзенко, Дубинчук, 1987; Dubinchuk, 1991];
- ультразвуковые колебания, способствующие выделению радона из кристаллической решетки;
- вариации скорости вертикального газового потока за счет изменения трещиноватости и пористости пород под действием тектонических напряжений [King, 1991].

2. Модель гидротермальной системы как резонатора с собственной частотой колебаний концентрации газов [Барсуков и др., 1985].

3. Физико-химическая модель периодического фракционирования примесных газов в газовых коллекторах в зоне фазового расслоения гидротермального раствора [Пономарев, 1989].

4. Модель «геогаза». Согласно представлениям о миграции Rn в грунте с полным влагонасыщением, поток газов в форме микропузырьков является основным механизмом транспортировки Rn к дневной поверхности [Varhegyi et al., 1986; Бондаренко, Иванова, 1999; Etiope, Martinelli, 2002]. При этом механизм миграции эндогенных газов определяется взаимодействием воды в порах и трещинах с породой. Согласно современным исследованиям, на глубинах в несколько тысяч метров пузырьки имеют диаметр  $10^{-2} \div 10^{-10}$  мм. При этом предполагается, что газы-транспортеры ( $H_2$ ,  $CO_2$  и  $CH_4$ ), находящиеся в нескольких состояниях (течение в газовой фазе, вытеснение воды газом, газовые пробки и пузыри), обеспечивают основной процесс миграции более тяжелых инертных газов (He, Rn).

Из всех перечисленных моделей наибольший интерес представляет модель, учитывающая изменение вертикальной скорости газового потока под действием тектонических напряжений [King, 1991]. Процессами, способствующими перемещению  $^{222}\text{Rn}$  в вертикальном направлении, могут быть [Новиков, 1989]:

- диффузия за счет градиента концентрации Rn;
- эффузия за счет градиента давления в земной коре;
- тепложидкостная конвекция, обусловленная подъемной силой, индуцированной геотермальным градиентом;
- газоподъемная сила в пористой среде при заполнении пор водой;
- изменение порового давления под действием изменяющихся напряжений в горном массиве;
- турбулентные эффекты в почвенном воздухе при изменении метеорологических факторов.

Все указанные выше процессы миграции Rn можно условно разделить на две группы: диффузионные, характеризующиеся, в основном, коэффициентом диффузии, и конвективные, характеризующиеся вектором скорости, направленным к поверхности земли. Сложность поиска предвестников землетрясений в поле подпочвенного Rn состоит в том, что из всего многообразия факторов, влияющих на динамику, надо выявить причину, связанную с изменениями напряженно-деформированного состояния среды.

На последней стадии подготовки землетрясений структурная неоднородность геосреды приводит к возникновению концентрации напряжений сжатия или растяжения в разломных зонах. В случае кратковременного сжатия блока геосреды могут возникать отрицательные радоновые аномалии в виде однополярного импульса или ступеньки.

Как было показано выше, для радоновых предвестников характерна различная длительность и многообразие их форм. Притом они могут проявляться на значительных расстояниях от эпицентров землетрясений. Большинство работ, в которых описываются радоновые предвестники, относятся к районам расположенным в зонах коллизий (Средняя Азия, Китай, Кавказ) с мелкофокусной коровой сейсмичностью. В них наглядно демонстрируются возможности радонового метода для прогноза землетрясений с глубиной очага 0–30 км и регистрацией Rn вблизи эпицентральной зоны. С этих позиций развитая сеть пунктов радонового мониторинга может сыграть положительную роль для оценки сейсмической опасности регионов, где преобладает коровая сейсмичность.

В целом радоновый мониторинг с целью прогноза землетрясений развивается почти во всех сейсмоактивных районах мира. Но следует четко представлять, что результативность радонового мониторинга вблизи очаговой зоны (мелкофокусные землетрясения в зонах

коллизии) значительно выше по сравнению с условиями зоны субдукции. Сейсмичность зоны субдукции района полуострова Камчатка определяется взаимодействием Евроазиатской и Тихоокеанской плит, когда эпицентры наиболее сильных землетрясений располагаются на дне Тихого океана и значительном расстоянии от пунктов регистрации. Однако перед 67% землетрясений с  $M > 5.5$  с эпицентрами в зоне субдукции района Авачинского залива, в поле почвенного Rn наблюдаются предвестники с  $t_{\text{тип}} = 1-8$  суток, обусловленные возникновением сигналов типа уединенных деформационных волн на последней стадии подготовки землетрясений [Макаров, 2011; Фирстов, Макаров, Малышева, 2011]. Так как относительная амплитуда аномалий в большинстве случаев составляла  $\delta = 20-30\%$ , то только по данным сети пунктов радонового мониторинга с апертурой  $\sim 40$  км их можно выделять на фоне сигнала с большим уровнем шума.

Приведенные выше примеры с большой достоверностью дают основание рассматривать возможность использования информации о динамике подпочвенного Rn для прогноза землетрясений в большом диапазоне магнитуд. Изучение вариаций Rn в подпочвенном воздухе дает возможность получать информацию о геодинамических процессах, протекающих в горном массиве, и позволяет говорить о свойствах среды, в которой мигрируют подпочвенные газы. Таким образом, радоновый мониторинг с целью изучения влияния напряженно-деформированного состояния геосреды на миграцию подпочвенных газов и поиска предвестников землетрясений является важной и актуальной задачей.

## **ГЛАВА 2. МЕТОДОЛОГИЧЕСКОЕ И АППАРАТУРНОЕ ОБЕСПЕЧЕНИЕ ПУНКТОВ МОНИТОРИНГА ПОДПОЧВЕННЫХ ГАЗОВ НА ПЕТРОПАВЛОВСК-КАМЧАТСКОМ ГЕОДИНАМИЧЕСКОМ ПОЛИГОНЕ**

Регистрацию концентрации  $R_n$  и его короткоживущих дочерних продуктов, можно осуществлять по всем трем видам излучений, сопровождающих радиоактивный распад. В условиях необходимости обеспечивать непрерывность мониторинга динамики концентрации  $R_n$  длительное время (десятки лет) с целью поиска предвестников землетрясений южной Камчатки наиболее надежным и метрологически простым оказался метод регистрации, предложенный в работе [Рудаков, 1992]. Концентрация радона в подпочвенном воздухе регистрируется по  $\beta$ -излучению продуктов распада  $RaC$  и  $RaB$  с помощью газоразрядных счетчиков. Многолетняя регистрация  $R_n$  в подпочвенном воздухе на сети пунктов Петропавловск-Камчатского геодинамического полигона показала высокую эксплуатационную надежность применяемого оборудования. В течение почти двадцатилетнего периода наблюдений за подпочвенными газами на Камчатке количество пунктов сети и их расположение менялось в связи с различными техническими и материальными причинами.

### **2.1. Расположение пунктов мониторинга концентрации подпочвенных газов на Петропавловск-Камчатском геодинамическом полигоне**

Для района шельфовой зоны и материкового склона Авачинского залива, где располагается Петропавловск-Камчатский геодинамический полигон, характерна блоковая структура, выделенная на основе интерпретации данных, полученных комплексными среднемасштабными геолого-геофизическими исследованиями [Попруженко, Зубин, 1997]. Основные структурные элементы зоны поперечных дислокаций прослеживаются в шельфовой зоне Авачинского залива до материкового склона и далее, где они находят продолжение в разломах и крупных морфоструктурных элементах (рисунок 2.1). Не исключено, что выделенные крупные тектонические блоки характеризуют неоднородность не только земной коры, но и литосферы. Крупные разломы, создавая существенную анизотропию литосферы, являются не только проводниками сейсмического воздействия, передаваемого вдоль разломных зон, но и играют немаловажную роль в передаче или экранировании деформационных

процессов, сопутствующих подготовке землетрясений. Как видно на рисунке 2.1, в этом отношении выгодно отличается Паратунский грабен, расположенный поперек доминирующего направления поля напряжений для основных структур Камчатского региона, в то время как сейсмичность Авачинского залива, в основном, приурочена к разломам Шипунский и Русский [Фирстов, 1999].

Как правило, аномальные выходы газов фиксируются в структурных узлах. Участки пересечения или сопряжения глубинных разломов земной коры могут сильно увеличивать тензочувствительность газогеохимических предвестников, в частности подпочвенного Rn. Поэтому, по мере возможности, пункты мониторинга ОА Rn располагались в районах разломов и других ослабленных зон, где могут концентрироваться деформации, связанные с изменениями напряженно-деформированного состояния геосреды на последней стадии подготовки землетрясений.

Геотермальные системы можно рассматривать как естественные деформографы, обладающие высокой геохимической чувствительностью к геодеформационным процессам. Поэтому на первом этапе был организован пункт мониторинга ОА Rn в районе Паратунского грабена (пос. Паратунка), для которого характерна мозаично-блоковая структура верхнего яруса земной коры. Расположение пункта регистрации в зоне грабена с блоковой структурой, и приуроченность его к хорошо развитой гидротермальной системе, должны увеличивать геохимическую чувствительность выбранного пункта к геодеформационным процессам перед сильными землетрясениями Камчатки и особенно землетрясениями района Авачинского залива.

На Петропавловск-Камчатском геодинамическом полигоне сеть пунктов мониторинга подпочвенных газов с целью поиска предвестников сильных землетрясений начала создаваться в 1997 г. [Фирстов, 1999]. На всех пунктах в первую очередь организовывался мониторинг подпочвенного Rn, а по мере расширения фронта работ ставилась аппаратура для регистрации концентрации молекулярного водорода (H<sub>2</sub>) и диоксида углерода (CO<sub>2</sub>).

Схема размещения пунктов, созданных и работавших в период 1997-2016 гг., показана на рисунке 2.1. По мере накопления информации изучалась тензочувствительность отдельных пунктов, что определяло их дальнейшую работу. В общей стратегии организации пунктов сети радонового мониторинга было желание располагать их в различных структурных элементах побережья Авачинского залива. Это увеличивало вероятность регистрации предвестниковых аномалий в динамике ОА Rn в связи с различной реакцией отдельных блоков района на геодеформационные процессы, обусловленные подготовкой сильных землетрясений (рисунок 2.1).

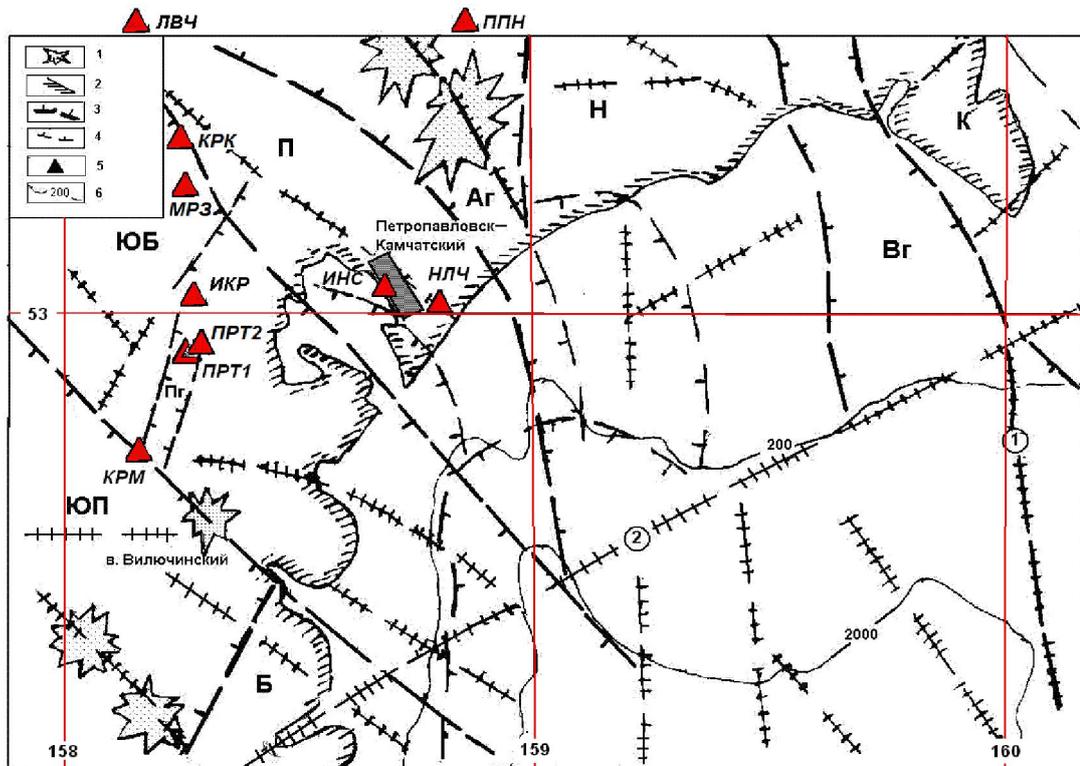


Рисунок 2.1 – Тектоническая схема акватории Авачинского залива [Попруженко, Зубин, 1997; Фирстов, 1999] и схема размещения пунктов регистрации концентрации подпочвенных газов за период 1997-2016 гг. на Петропавловск-Камчатском геодинамическом полигоне.

1 – четвертичные вулканы; 2 – береговая линия; 3 – наиболее крупные разломы со значительными вертикальными смещениями (границы структур); 4 – разломы второго порядка (бергштрихи указывают на опущенный блок); 5 – пункты сети мониторинга подпочвенного Rn; 6 – изобаты.

Геолого-тектонические структуры: Н – Налычевское поднятие; К – Калатырский горст; П – Петропавловский горст; Б – Береговой горст; Аг – Авачинский грабен; Пг – Паратунский грабен; Вг – Вахильский грабен, синклиналь; ЮБ – Южно-Быстринский блок; ЮП – Южно-Камчатский прогиб.

Цифры в кружках – разломы регионального порядка: 1 – Шипунский, 2 – Русский.

Названия пунктов: НЛЧ – пограничная застава «Налычево»; ИНС – скважина НИС-1 вблизи здания Института вулканологии и сейсмологии Дальневосточного отделения РАН (ИВиС ДВО РАН); ПРТ1 – геотермальный стационар ИВиС ДВО РАН в пос. Паратунка; ПРТ – опорный пункт, долина ручья «Коркина», пос. Паратунка; КРМ – стационар «Верхнепаратунский» ИВиС ДВО РАН, пойма р. Карымшина; КРК – район поселка Северные Коряки, пойма р. Гаванка, МРЗ – скважина «Морозная-1», гора Морозная, пойма р. Половинка; ИКР – Институт космофизических исследований и распространения радиоволн Дальневосточного отделения РАН (ИКИР ДВО РАН); ЛВЧ – пойма р. Левая Авача; ППН – Природный парк «Налычево».

В настоящее время работает сеть из шести пунктов, образующих почти правильный треугольник со стороной ~40 км (рисунок 2.2). Все пункты располагаются в речных долинах, трассирующих разломные зоны. Датчики, газоразрядные счетчики  $\beta$ -излучения дочерних короткоживущих продуктов распада  $Rn$ , как правило, располагаются в аллювиально-делювиальных отложениях в зоне аэрации.

Аппаратурная база за время существования сети модернизировалась и оснащалась современными цифровыми приборами. Одновременно с регистрацией ОА  $Rn$  накапливалась информация о метеорологических величинах (температура воздуха и атмосферное давление) и концентрации других почвенных газов [Макаров и др. 2012].

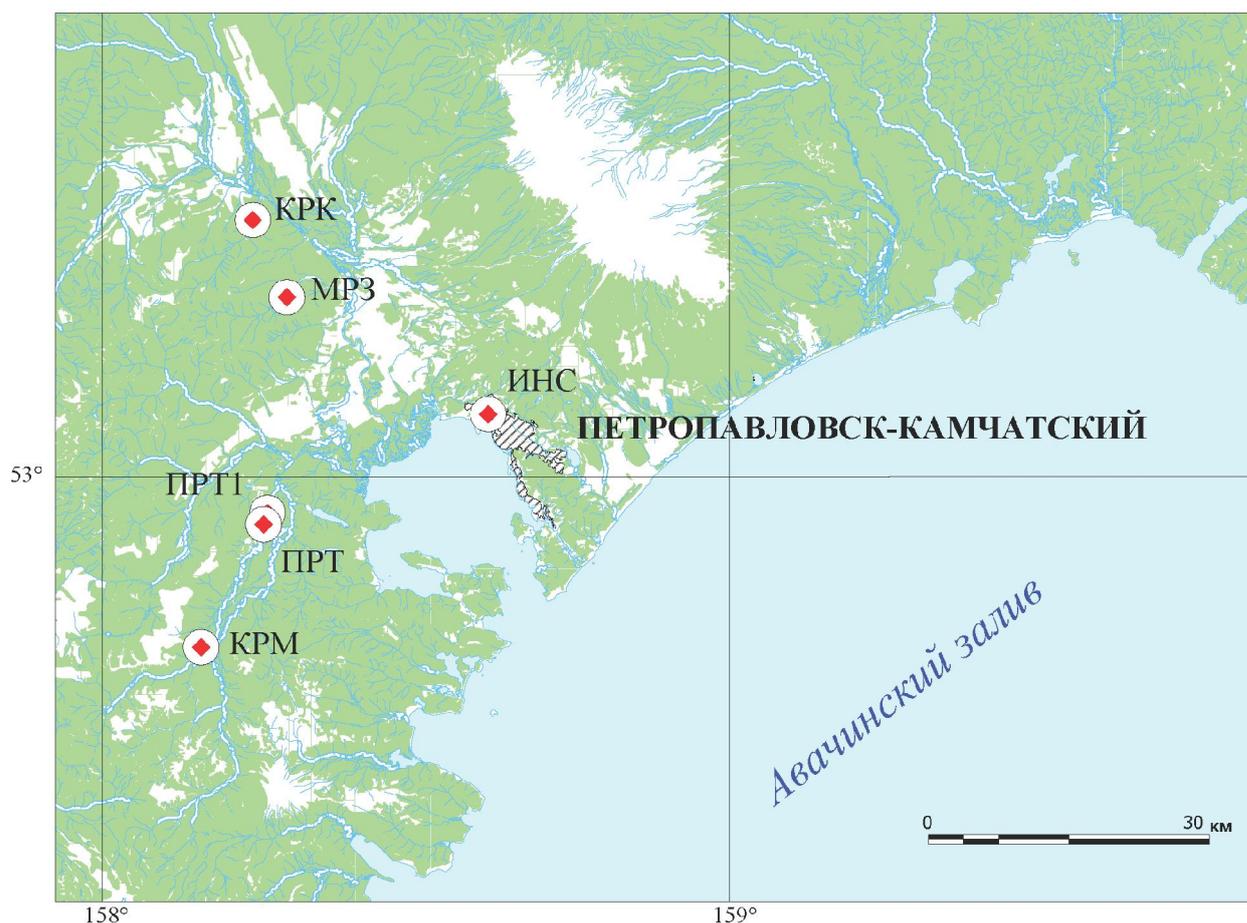


Рисунок 2.2 – Схема размещения пунктов регистрации концентрации почвенных газов на Петропавловск-Камчатском геодинамическом полигоне на ноябрь 2016 г.

Названия пунктов: ИНС – скважина НИС-1 вблизи здания ИВиС ДВО РАН; ПРТ1 – геотермальный стационар ИВиС ДВО РАН в пос. Паратунка; ПРТ – опорный пункт, долина ручья «Коркина», пос. Паратунка; КРМ – стационар «Верхнепаратунский», пойма р. Карымшина; КРК – район поселка Северные Коряки, пойма р. Гаванка; МРЗ – скважина «Морозная-1», гора Морозная, пойма р. Половинка. Расстояние между пунктами: КРМ–КРК ~46 км; ИНС–КРК ~33 км; КРМ–ИНС ~40 км.

## 2.2. Аппаратура для регистрации концентрации подпочвенных газов и метеорологических величин

Начиная с 1997 г. на Петропавловск-Камчатском геодинамическом полигоне ведется мониторинг  $Rn$  в подпочвенном воздухе с целью поиска предвестников сильных землетрясений Южной Камчатки [Фирстов, 1999; Макаров и др., 2012]. Регистрация  $Rn$  с начала создания сети велась с помощью радиометра РЕВАР (регистратор вариаций радона), в основу которого положен принцип пассивной регистрации продуктов распада  $Rn$  по  $\beta$ -излучению.

С целью автоматизации мониторинга подпочвенных газов и замены устаревших приборов РЕВАР, в лаборатории акустического и радонового мониторинга (АРМ) КФ ФИЦ ЕГС РАН на базе регистрирующего устройства ALMEMO немецкой фирмы Ahlborn был разработан и создан аппаратурный комплекс для регистрации концентрации подпочвенных газов (РКПГ) [Макаров и др., 2012]. В качестве датчиков в РКПГ использованы как серийные приборы и узлы, так и некоторые разработки, выполненные в лаборатории АРМ. На рисунке 2.3 приведена блок-схема и общий вид аппаратурного комплекса РКПГ на базе регистратора ALMEMO-2690-8. Далее дано описание отдельных блоков РКПГ.

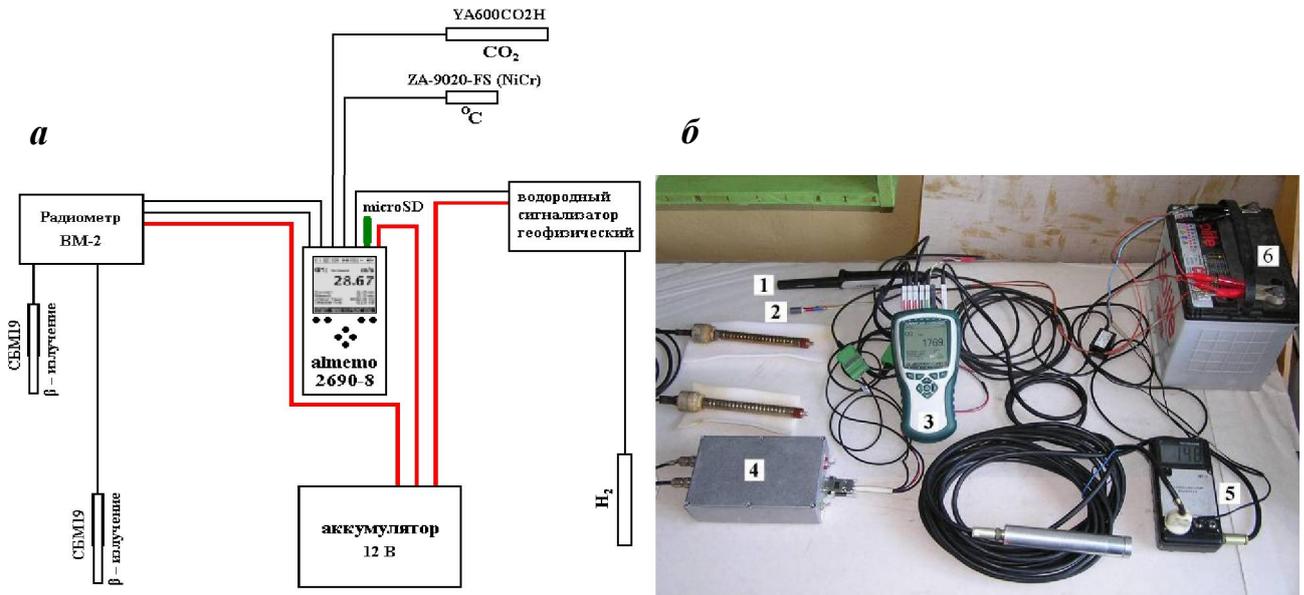


Рисунок 2.3 – Блок-схема (а) и общий вид (б) аппаратурного комплекса РКПГ. Измерительные приборы: 1 – датчик CO<sub>2</sub>, 2 – датчик температуры, 3 – регистратор данных ALMEMO 2690-8, 4 – радиометр ВМ-2, 5 – водородный геофизический сигнализатор ВСГ-02, 6 – аккумулятор.

Регистратор данных ALMEMO-2690-8. Регистрирующие устройства ALMEMO оборудованы системой интеллектуальных коннекторов, позволяющих подключать датчики, регистрирующие более 65 различных параметров. Одна из моделей регистрирующих устройств ALMEMO-2690-8 имеет пять изолированных измерительных входов, часы реального времени и емкость встроенной памяти 512 кБ. Память может быть расширена с помощью внешнего модуля с использованием карт памяти формата microSD. Два выходных разъема позволяют подключить любой выходной модуль ALMEMO (например, аналоговый выход), цифровой интерфейс, триггерный вход или контакты сигнализации. Несколько регистрирующих устройств могут быть объединены в сеть с использованием специального сетевого кабеля. Для синхронизации регистрирующего устройства ALMEMO с ПЭВМ прилагается специальная программа AMR control, которая дает возможность управлять регистрирующим устройством, импортировать накопленные данные в различных форматах, а также осуществлять настройку прибора. Потребляемый ток в режиме измерений с подключенным датчиком CO<sub>2</sub> составляет в среднем 260 мА. Напряжение питания 7÷13 В постоянного тока.

Все получаемые и накапливаемые устройством ALMEMO-2690-8 данные являются хорошо детализированными, что обусловлено возможностью регистратора задавать время дискретизации от 1 секунды до десятков часов и сравнительно большим объемом долговременной энергонезависимой памяти. Другие модели регистрирующего устройства ALMEMO мало чем отличаются от описанной модели.

Регистрирующие устройства ALMEMO позволяют удаленно получать данные в режиме реального времени с помощью модема ZA-1709-GSM, передающего информацию по сети GSM. Модем представляет собой компактное устройство для мобильного и стационарного применения. Для управления модемом используется набор AT-Hayes команд для GSM (ETSI стандарт для GSM 07.07/07.05). Скорость передачи данных 9600 бод. Интерфейс подключения RS232 с использованием 9-контактного разъема ALMEMO. Для своей работы модем требует источника напряжения от 11 до 31 В постоянного тока. Энергопотребление модема в режиме передачи данных 325 мА, в режиме ожидания – 47 мА. Диапазон рабочих температур от –20 до +70 °С. Для работы модема требуется sim-карта GSM-стандарта любого сотового оператора, представленного в регионе и наличие покрытия беспроводной сетью оператора в районе расположения пункта регистрации почвенных газов. В принимающем центре с помощью аналогичного модема можно получать и сохранять информацию на ПЭВМ, управлять устройством ALMEMO, синхронизировать его внутренние часы.

Стационарные пункты, на которых есть наземное телефонное соединение, и имеется возможность подключения DSL, могут быть подключены к удаленному рабочему месту оператора по телефонной линии с помощью кабеля ZA-1945-DK, предназначенного для

подключения устройства ALMEMO непосредственно к компьютерной сети Ethernet. Связь с устройством может быть осуществлена с помощью технологии aDSL (A – Asymmetric – асимметричная цифровая пользовательская линия), используемой в традиционных телефонных сетях общего пользования (PSTN – Public Switched Telephone Network). С помощью такого соединения возможно удаленное управление устройством, синхронизация времени и получение данных в режиме реального времени. Преимущество этого способа связи заключается в более надежном и помехоустойчивом соединении, но оно не может быть использовано при отсутствии наземных телефонных линий.

Регистраторы  $\beta$ -излучения – ВМ-4, ВМ-2, разработанные и изготовленные в лаборатории АРМ КФ ФИЦ ЕГС РАН, предназначены для регистрации  $\beta$ -излучения при распаде короткоживущих дочерних продуктов  $R_n$  с помощью газоразрядных счетчиков СБМ-19 или СТС-5, описание которых дано в разделе 2.3. Отдельные кванты ионизирующего излучения в виде импульсов подаются на регистрирующее устройство ALMEMO через коннектор ZA-9909-AK2U, позволяющий регистрировать до 65000 имп/с.

Блок-схема радиометра ВМ-2 приведена на рисунке 2.4. Регистрация количества импульсов, отсчет времени и запись данных в модуль памяти происходит на устройстве ALMEMO.

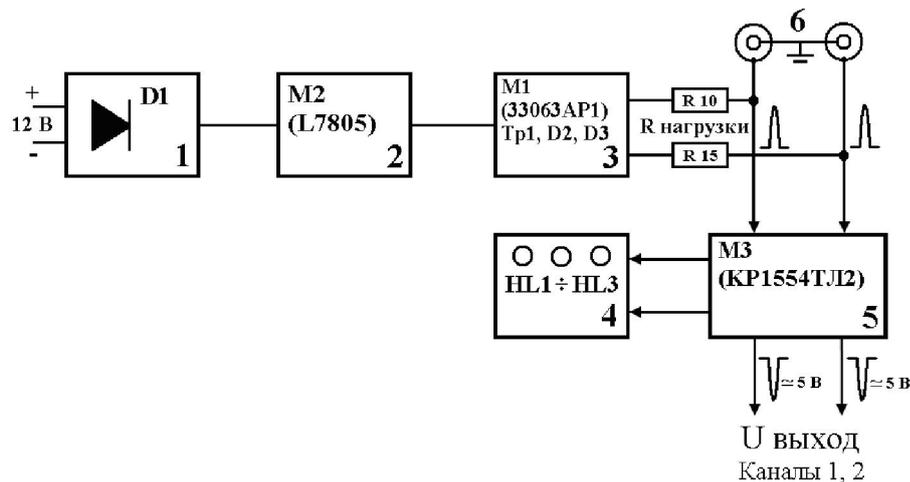


Рисунок 2.4 – Схема двухканального регистратора  $\beta$ -излучения.

1 – схема защиты от переплюсовки питания; 2 – стабилизатор напряжения +12 В/+5 В; 3 – маломощный стабилизированный преобразователь напряжения +5 В/–400 В; 4 – схема индикации; 5 – усилитель-формирователь импульса счета и индикации; 6 – газоразрядные счетчики СБМ-19.

При включении радиометра питающий ток проходит через схему защиты от переплюсовки питания, работающую на базе диода D1 и поступает в схему стабилизации напряжения, где с помощью микросхемы L7805 напряжение преобразуется с +12 В до +5 В.

Далее стабилизированное напряжение +5 В поступает на маломощный преобразователь напряжения и на усилитель-формирователь импульса счета. В стабилизированном преобразователе напряжения с помощью микросхемы М1, повышающего трансформатора Тр1 и выпрямителя происходит преобразование напряжения +5 В/–400 В. Напряжение –400 В через сопротивление нагрузки R10, R15 поступает на счетчики СБМ-19, с которых импульс положительной полярности поступает в усилитель-формирователь импульсов счета и на схему индикации. Сформированные импульсы отрицательной полярности из усилителя-формирователя импульсов счета попадают на коннектор ALMEMO ZA-9909-AK2U, в котором происходит их подсчет за период, заданный оператором. По окончании этого периода число импульсов, поступившее в коннектор, записывается в память регистрирующего устройства ALMEMO и начинается следующий цикл измерений. Питание радиометра осуществляется от аккумуляторной батареи или любого источника постоянного тока напряжением +12 В. Потребляемый ток в режиме измерений составляет 10 мА. Регистраторы  $\beta$ -излучения ВМ-4 отличается от ВМ-2 наличием еще двух каналов регистрации.

Переход от импульсов к ОА Rn осуществлялся по эмпирической формуле ОА Rn ( $\text{Бк/м}^3$ ) =  $9 \cdot N$ , где N - число зарегистрированных датчиками  $\beta$ -излучения импульсов за минуту, полученной в результате одновременной регистрации сертифицированными радиометрами RS-410F фирмы femto-TECH (США), РРА-01М-03 фирмы ООО НТМ-Защита (Россия) и РКПГ с ВМ-2/4.

Используемый для измерения концентрации диоксида углерода ( $\text{CO}_2$ ), датчик фирмы ALMEMO (FYA600CO2H) представляет собой компактное устройство для мобильного и стационарного применения. Работа датчика основана на принципе двухканального инфракрасного поглощения. Диапазон измерений составляет от 0 до 10 000  $\text{см}^3/\text{м}^3$ . При нормальных условиях точность измерения концентрации  $\text{CO}_2$  от 0 до 5000  $\text{см}^3/\text{м}^3 \pm (50 \text{ см}^3/\text{м}^3 + 2\%$  от измеренной величины), а от 5000 до 10 000  $\text{см}^3/\text{м}^3 \pm (100 \text{ см}^3/\text{м}^3 + 3\%$  от измеренной величины). Нормальными условиями для работы датчика являются температура  $22 \pm 2 \text{ C}^\circ$  и влажность не более 50%. Разрешающая способность датчика 1  $\text{см}^3/\text{м}^3$ . Измерять величину  $\text{CO}_2$  можно при температуре окружающего воздуха от 0 до +50  $\text{C}^\circ$  и влажности от 0 до 90%. Для работы датчик требует источника напряжения 6.5–12 В постоянного тока и может быть запитан от регистратора ALMEMO. Энергопотребление датчика ~40 мА. Датчик подключается к регистрирующему устройству с помощью кабеля длиной 1.5 м, но может быть применен и удлинитель до 5 м.

Водородный сигнализатор геофизический ВСГ-02 предназначен для непрерывных наблюдений за изменением концентраций  $\text{H}_2$  в почвенном воздухе. Он состоит из чувствительного элемента, первичного электронного преобразователя и электронного блока

включения сеансного режима работы. Для проведения измерений чувствительный элемент помещается в скважину или шурф. Отбор анализируемой воздушной пробы на него происходит диффузионно. Блок первичного электронного преобразователя преобразует изменения емкости чувствительного элемента в напряжение под воздействием вариаций концентрации  $H_2$  [Быковский и др., 1991].

Диапазон измеряемых концентраций  $H_2$  в воздухе лежит в пределах  $0.5-50 \text{ см}^3/\text{м}^3$ , разрешающая способность  $0.5 \text{ см}^3/\text{м}^3$ . Относительная погрешность измерений не превышает 20%. Потребляемый ток в режиме измерений составляет 120 мА. Напряжение питания 12 В постоянного тока. Прибор ВСГ-02 подключается к прибору ALMEMO с помощью коннектора ZA 9600-FS3V12.

В настоящее время в пунктах ПРТ и ИНС устаревшие датчики водорода ВСГ-02 заменены на современные японские датчики фирмы FIGARO, которые отличаются значительно более широким диапазоном измеряемых концентраций  $H_2$  и более высокой чувствительностью.

Датчик температуры ZA-9020-FS. В этом датчике температуры используется термопара (NiCr-Ni). Диапазон измерений составляет от  $-200 \text{ C}^\circ$  до  $+1370 \text{ C}^\circ$  с разрешающей способностью  $0.1 \text{ C}^\circ$ .

### **2.3. Особенности использования газоразрядных счетчиков в качестве датчиков концентрации подпочвенного радона**

Газоразрядные счетчики – самые распространенные детекторы  $\gamma$ - и  $\beta$ -излучений. Высокая чувствительность счетчиков позволяет регистрировать отдельные кванты ионизирующего излучения, а большой выходной сигнал легко регистрируется пересчетными схемами. Продолжительность жизни используемых счетчиков составляет  $10^9$  импульсов, что дает возможность их эксплуатации на Петропавловск-Камчатском геодинимическом полигоне в течение 1.5-2 лет. Проведенные исследования выпускаемых отечественной промышленностью газоразрядных счетчиков моделей СТС-5 и СБМ-20 показали, что разброс их чувствительности не превышает  $\pm 10\%$  от паспортной величины. Длительный срок хранения (до 50 лет) и продолжительная эксплуатация не оказывают влияния на первоначальную чувствительность счетчика, изготовленного без нарушения технологического процесса [Глухов и др., 2009]. Все это позволяет вести регистрацию концентрации  $Rn$  в подпочвенном воздухе с высокой степенью надежности и достаточно простой метрологией.

На первом этапе работ газоразрядные счетчики служили датчиками концентрации подпочвенного радона для радиометров РЕВАР [Фирстов, Рудаков, 2003]. С целью повышения чувствительности газоразрядные счетчики СТС-5 размещались в 10 литровых накопительных камерах по схеме, приведенной на рисунке 2.5.



Рисунок 2.5 – Схема размещения газоразрядных датчиков СТС-5 для регистрации  $\beta$ -излучения продуктов распада радона.

С целью оценки идентичности три газоразрядных счетчика помещались одновременно в накопительных камерах и размещались в одной точке. Регистрация со временем дискретизации две минуты осуществлялась в течение двух суток. Через 18-24 ч после начала эксперимента на всех каналах четко выделялся период достижения равновесного режима с амплитудой 1.9, 2.1, 2.5 кБк/м<sup>3</sup> (рисунок 2.6), т.е. относительный разброс каналов составлял ~30%, который отражал не идентичность условий установки накопительных камер и в меньшей мере разброс чувствительности газоразрядных счетчиков.

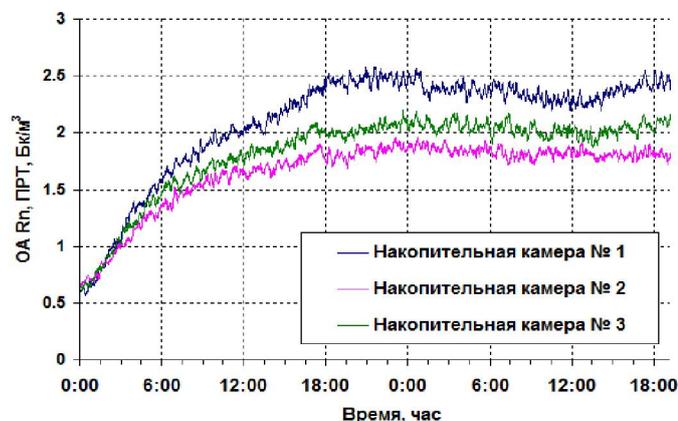


Рисунок 2.6 – Динамика ОА Rn в трех накопительных камерах после их установки.

Поэтому при смене счетчиков всегда вводились поправочные коэффициенты относительно эталонного счетчика. Как правило, в пунктах регистрации датчики устанавливались на двух глубинах зоны аэрации один и два метра.

#### 2.4. Оснащение пунктов мониторинга подпочвенных газов и строение верхней толщи грунта в районах их расположения

Как правило, расположение пунктов сети мониторинга подпочвенных газов приурочивалось к речным долинам, которые трассируют разломные зоны. Зоны динамического влияния (ЗДВ) разломов имеют повышенную проницаемость, которая способствует стоку подпочвенных газов в атмосферу [Фирстов, Рудаков, 2003; Рудаков, 2009]. Кроме того, пункты располагались в разных структурных элементах побережья Авачинского залива (рисунок 2.1).

**Опорный пункт ПРТ** расположен на речной террасе ручья «Коркина», трассирующего субширотный разлом в пределах Паратунского грабена, с приуроченной к нему одноименной геотермальной системой. На расстоянии ~700 м от пункта ПРТ ниже по течению ручья находятся естественные выходы термальных вод с содержанием растворенного  $Rn$  до  $1.5 \text{ кБк/м}^3$ . В пункте ПРТ в трех точках по профилю, перпендикулярному ЗДВ разлома [Фирстов, Рудаков, 2003], регистрируются 12 параметров концентрации подпочвенных газов и значения метеорологических величин (рисунок 2.7):

– **ПРТ\_1** – подсобное помещение, врезанное в склон, где ведется регистрация  $Rn$  в аллювиальных отложениях в зоне аэрации на глубине один метр от дна помещения и в воздухе (газоразрядные счетчики СБМ-19, ГС<sub>1ПРТ</sub>, ГС<sub>2ПРТ</sub>). Регистрация ведется с помощью двухканального радиометра РЕВАР.

– **ПРТ\_2** – подвал под домом глубиной ~1.7 м на 21 м ниже по склону от ПРТ\_1. В этой точке регистрация  $Rn$  ведется на глубине ~3 м (счетчик ГС<sub>3ПРТ</sub>) от дневной поверхности в зоне полного влагонасыщения с помощью РКПГ на базе регистратора АЛМЕМО [Макаров и др., 2012]. Здесь же регистрируются атмосферное давление и температура воздуха.

– **ПРТ\_3** – подвальное помещение хозяйственной постройки глубиной 1.7 м, где также установлен РКПГ. Здесь одновременно со счетом импульсов с двух газоразрядных счетчиков (глубины около 3 и 4 метров от дневной поверхности, счетчики ГС<sub>4ПРТ</sub>, ГС<sub>5ПРТ</sub>) регистрируются концентрации углекислого газа ( $CO_2$ ) и молекулярного водорода ( $H_2$ ) на глубинах ~3 метров. С помощью радиометра СПР-68-01 на глубине ~1.5 м от поверхности пола помещения регистрируется  $\gamma$ -излучение. С поверхности пола двумя торцевыми счетчиками  $\beta$ -излучения СБТ-10 измеряется плотность потока радона (ППР). Накопительная камера работает по схеме – 5 минут проветривание и 25 минут накопление. Этот вид наблюдений был организован с целью многофакторного эксперимента по процессам переноса  $Rn$  в системе

«литосфера-атмосфера» [Яковлева и др., 2009]. Регистрация на всех датчиках осуществляется с дискретностью 10 минут.

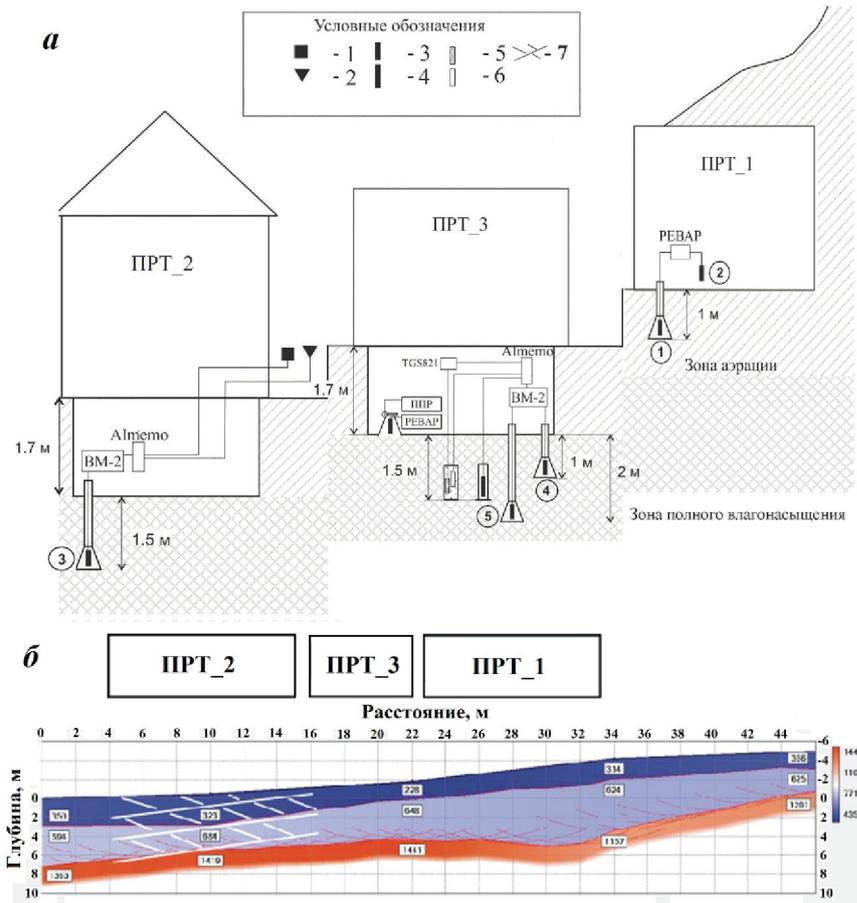


Рисунок 2.7 – Схема размещения датчиков для регистрации концентрации почвенных газов в опорном пункте ПРТ (а); скоростной разрез Р-волн по данным сейсморазведочного профиля, пройденного вблизи пункта ПРТ (б).

1 – датчик давления; 2 – датчик температуры; 3 – газоразрядные счетчики  $\beta$ -излучения; 4 – датчик  $\gamma$ -излучения; 5 – датчик молекулярного водорода; 6 – датчик углекислоты; 7 – участок разуплотнения, выделенный на георадарном профиле.

**Пункт ПРТ1** расположен на базе геотермального стационара ИВиС ДВО РАН в долине р. Паратунка на возвышенности. В пункте установлен автоматизированный комплекс РКПГ. Регистрация концентрации  $R_n$  осуществляется на двух глубинах зоны аэрации. Кроме того регистрируется  $\beta$  и  $\gamma$ -излучение в воздухе на высотах 2.5 и 5 метров (рисунок 2.8а). Данный пункт был создан с целью многофакторного эксперимента по процессам переноса  $R_n$  в системе «литосфера-атмосфера» [Яковлева и др., 2009]. С пунктом установлена связь по каналу сети GSM, что дает возможность получать накопленные данные и управлять регистратором данных ALMEMO в оперативном режиме.

**Пункт КРМ** расположен в пойме р. Карымшина на стационаре «Верхнепаратунский» ИВиС ДВО РАН. В этом пункте регистрация радона ведется на глубине 1.5 м зоны аэрации и в

подвальной емкости. Большой объем емкости ( $V = 1.8 \text{ м}^3$ ), выполняющей роль накопителя  $Rn$  и его дочерних продуктов распада, позволяет увеличить чувствительность канала в три раза. Так как  $Rn$  является естественным ионизатором и вносит большой вклад в формирование электрического поля приземного слоя атмосферы, в пункте КРМ установлены флюксометры ЭФ-4 [Ефимов и др., 2013], регистрирующие вертикальную составляющую напряженности атмосферного электрического поля ( $E_z$ ) над и под эквипотенциальной поверхностью. С пунктом установлена связь по каналу сети GSM, позволяющая оперативно получать данные (рисунок 2.8б).

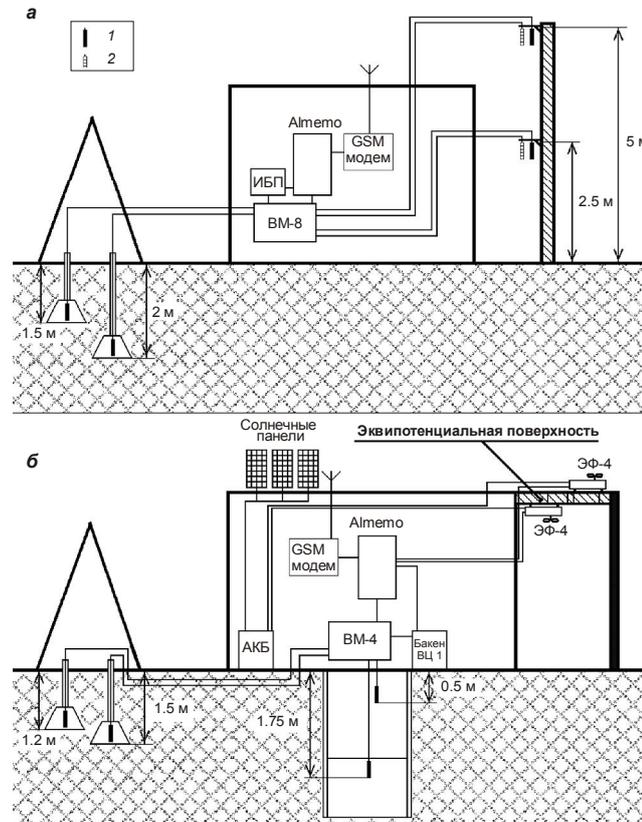


Рисунок 2.8 – Схема размещения датчиков для наблюдений за концентрацией почвенных газов на пункте ПРТ1 (а), КРМ (б).

1 – датчик  $\beta$ -излучения; 2 – датчик  $\gamma$ -излучения; ЭФ-4 – флюксометры; ВМ-4(8) – четырех(восьми)канальный формирователь импульсов для регистрации  $\beta$ -излучения в составе РКПГ [Макаров и др., 2012].

**Описание пункта ИНС.** Пункт ИНС, работающий с 2006 г., в настоящее время оснащен РКПГ, собранным на базе двух регистраторов ALMEMO-2590-9 и ALMEMO-2390-8 [Макаров и др., 2012]. Пункт создан на базе скважины НИС-1, располагающейся рядом со зданием ИВиС ДВО РАН. Скважина НИС-1 глубиной 350 м находится в пределах Петропавловского горста в районе погребенной депрессии. На всю глубину скважина обсажена стальными трубами, а в интервале 265–295 м установлен щелевой фильтр. Уровень воды в скважине в зависимости от

сезона колеблется от 51 до 52.5 м. Когда создавался пункт регистрации подпочвенных газов, ствол скважины был забит, разбурить ее удалось до глубины 16 м, а ниже образовалась техногенная «пробка». Над оголовком скважины был сооружен подземный бункер размером 2·2·2 м, над которым установлен металлический контейнер. Подземный бункер через контейнер и систему труб вентилируется за счет естественной конвекции воздуха. Регистрация всех параметров осуществляется с частотой дискретизации  $6.0 \text{ ч}^{-1}$ .

В металлическом контейнере и бункере производятся измерения атмосферного давления и температуры воздуха. В бункере осуществляется регистрация  $R_n$  тремя газоразрядными счетчиками: в зоне аэрации на глубине один метр, на глубине 0.1 м от «поверхности» пола бункера и в воздухе. В стволе скважины на глубинах от 3 до 15.5 м регистрируются:  $R_n$ ,  $H_2$ ,  $CO_2$ , и температура воздуха (рисунок 2.9).

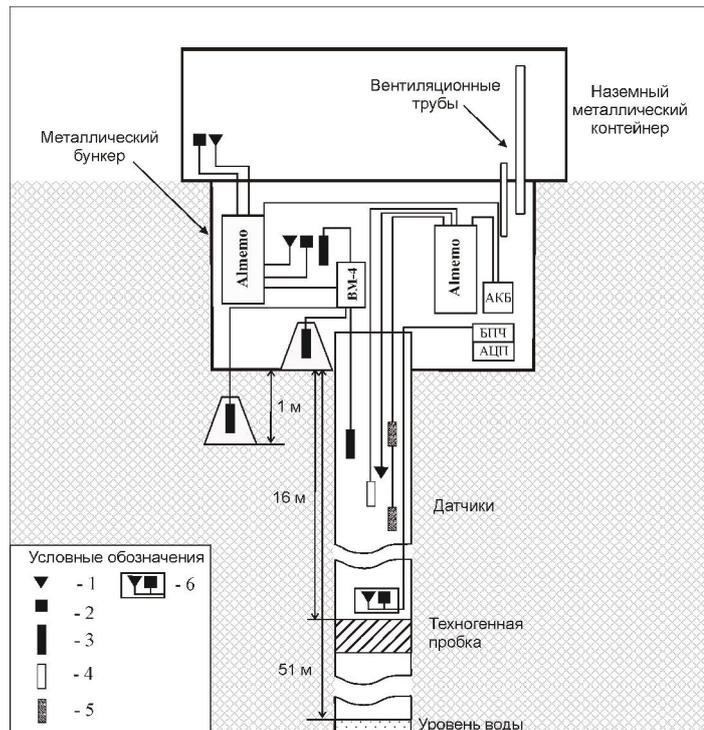


Рисунок 2.9 – Схема размещения датчиков в пункте ИНС: 1 – датчик температуры; 2 – датчик давления; 3 – датчик  $\beta$ -излучения; 4 – датчик  $CO_2$ ; 5 – датчик  $H_2$ ; 6 – прецизионные датчики температуры и давления. ВМ-4 – четырехканальный формирователь импульсов для регистрации  $\beta$ -излучения прибором ALMEMO [Макаров и др., 2012].

Измерение концентрации  $H_2$  производится двумя приборами: датчиком водорода TGS821 японской фирмы FIGARO и водородным геофизическим сигнализатором (ВСГ-02), которые позволяют регистрировать концентрацию  $H_2$  в пределах  $30\text{--}1000 \text{ см}^3/\text{м}^3$ . Дополнительно для прецизионных измерений температуры и давления в стволе скважины на глубине 15.5 м в 2014 г. был размещен кварцевый датчик ПДТК-0.1MP, обладающий разрешающей

способностью 0.01 °С по температуре и 0.05 мм рт. ст. по давлению. Регистрация осуществлялась через частотомер МЦ-1 производства ООО «КварцСенс» с помощью регистратора JORES, разработанного в КФ ФИЦ ЕГС РАН [Махмудов, 2015]. Высокая чувствительность данного устройства позволяет вести регистрацию вариаций температуры воздуха в скважине, которая является реакцией на гидрогеологический отклик, возникающий при изменении напряженно-деформированного состояния геосреды на последней стадии подготовки землетрясений с  $M > 5.5$ .

**В пункте КРК** регистрируется только подпочвенный Rn с помощью регистратора вариаций Rn (РЕВАР). Пункт КРК расположен в районе поселка Северные Коряки (пойма р. Гаванка) (рисунок 2.2).

**Пункт МРЗ** расположен на базе скважины «Морозная-1» (Елизовский район). В пункте установлен РКПГ. Регистрация концентрации Rn осуществляется в накопительных камерах на двух глубинах 0.2 и один метр. Данный пункт создан с целью расширения сети мониторинга подпочвенных газов и поиска связи между вариациями уровня грунтовых вод и концентрации подпочвенного Rn.

Как было сказано в разделе 2.1, пункты сети радонового мониторинга располагаются в разных структурных элементах побережья Авачинского залива и имеют свои особенности строения рыхлых аллювиально-делювиальных отложений, в зоне аэрации которых размещены газоразрядные датчики  $\beta$ -излучения дочерних короткоживущих продуктов распада Rn (рисунок 2.1, 2.2). На процесс миграции Rn в рыхлых отложениях основное влияние оказывает проницаемость, зависящая от свойств и строения грунта, наличие водоносного горизонта, а так же изменение напряженно-деформированного состояния блока геосреды в районе пункта регистрации. С целью лучшего понимания причин появления аномалий в поле подпочвенных газов перед землетрясениями района Авачинского залива и выбора математических моделей, объясняющих их появление, было выполнено исследование строения верхней части геологического разреза в наиболее оснащенных пунктах регистрации.

Исследование строения верхней части геологического разреза в пунктах радонового мониторинга осуществлялось с помощью цифровой инженерной сейсморазведочной станции «Лакколит X-M3» и георадара «Око-2» в модификации АБДЛ «Тритон» с частотой дипольных излучателей 50 и 100 МГц.

Сейсморазведочные работы проводились в модификации сейсмозондирования методом преломленных волн (МПВ) по системе точечного зондирования с получением пар встречных и расходящихся годографов. Длина расстановки сейсмического зонда составляла 46 м, при шаге между сейсмоприемниками в 2.0 м. Возбуждение зондирующего импульса осуществлялось ударом ручного тампера весом 8 кг по металлической подставке. Скоростные разрезы

строились с помощью прикладного пакета программ «RadExPro» по общепринятой методике, способом пластовых скоростей. В результате интерпретации были получены значения скоростей распространения продольных волн ( $V_P$ ) в отдельных слоях, выделены соответствующие им границы и определена их мощность.

Георадар – мобильный и компактный современный геофизический прибор, позволяющий проводить обследование поверхностного слоя грунта с высокой детальностью до глубин ~25 м. Он представляет собой радиолокатор, направляющий зондирующие электромагнитные импульсы метрового и дециметрового диапазона в исследуемую среду, которые, отражаясь от границ слоев с различными электрофизическими свойствами, дают представление о границах исследуемого разреза. Такими границами могут быть уровень грунтовых вод и контакты: между сухими и влагонасыщенными грунтами, между породами различного литологического состава [Владов, Старовойтов, 2005]. Интерпретация материалов радарной съемки проводилась в программном комплексе «GeoScan32».

В трех наиболее оснащенных пунктах радонового мониторинга (ПРТ, ПРТ1, КРМ, рисунок 2.2) в 2014 г. были выполнены сейсморазведочные и георадарные работы для оценки физико-литологических свойств грунтов верхней части геологического разреза [Фирстов, Макаров, Акбашев, 2015].

На сейсмических профилях по скоростным границам выделяются два слоя:

- 1) почвенно-пирокластический чехол мощностью  $h=1.8-2.7$  м, с диапазонами скоростей поперечных волн  $V_S=127-207$  м/с и продольных волн  $V_P=228-366$  м/с.
- 2) песчано-глинистые отложения аллювиального происхождения  $h=1.6-9.5$  м, с  $V_S=372-446$  м/с и  $V_P=624-694$  м/с.

Подложкой для второго слоя является крупнообломочный материал с песчаным заполнителем аллювиально-флювиогляциального происхождения fQII-III, с  $V_S=464-505$  м/с и  $V_P=1157-1441$  м/с.

По данным сейсморазведки на основе работы [Аникин, Горшенин, 1985] рассчитывались основные физико-литологические параметры грунтов: влажность ( $W$ , %), плотность ( $\rho$ , г/см<sup>3</sup>), пористость ( $\eta$ , %). Рассчитанная влажность по данным сейсморазведки, соответствующая уровню грунтовых вод (УГВ), находится на глубине ~6 м.

Георадиолокационный профиль длиной 270 м был пройден поперек долины ручья Коркина в пункте ПРТ. На георадиолокационном разрезе были выделены три участка с резким понижением границы. Второй и третий участки совпадают с участками разуплотненных зон, выявленных по результатам сейсмозондирования. В пунктах ПРТ1 и КРМ геологическое строение верхней толщи оказалось близкое к ПРТ.

Расположение профилей при проведении разведочных работ на пункте ПРТ показано на рисунке 2.10. Скорости сейсмических волн и мощности слоев, полученные на пункте ПРТ, приведены в таблице 2.1, где также приведены расчетные значения физико-литологических свойств грунтов. Сейсмические разрезы и георадиолокационный профиль показаны на рисунке 2.11а,б,в.

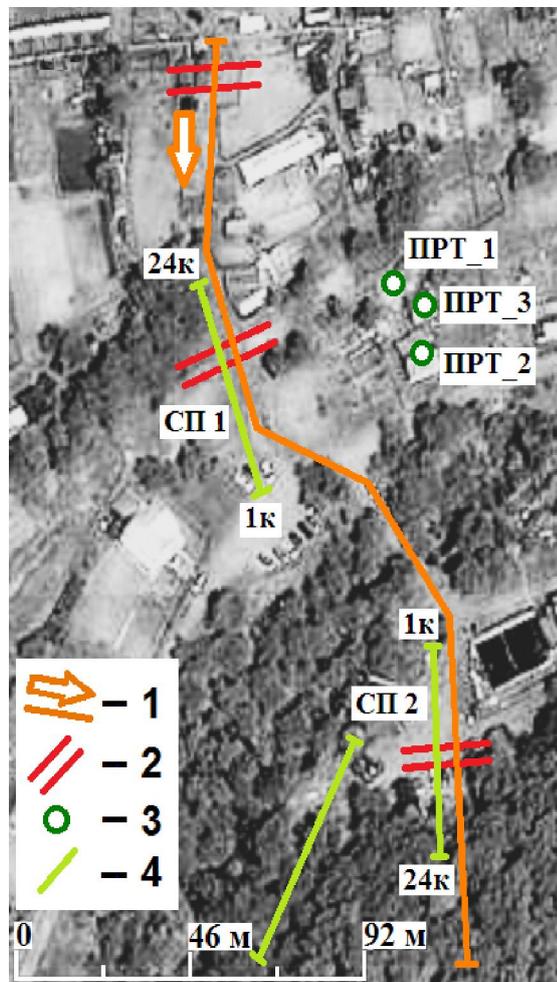


Рисунок 2.10 – Расположение профилей при проведении разведочных работ на пункте ПРТ: 1 – георадиолокационный профиль, направление движения по профилю; 2 – участки разуплотненных зон; 3 – точки радонового мониторинга пункта ПРТ; 4 – сейсмический профиль (СП).

В районе пункта ИНС сейсморазведочные работы были проведены в 2016 г. Работы проводились с помощью точечного сейсмондирования с получением пар встречных и нагоняющих годографов. Длина двух профилей составляла 94 м с шагом между сейсмоприемниками 2.0 м. Возбуждение зондирующего импульса осуществлялось ударом ручного тампера весом 6 кг по металлической подставке. Работы проводились цифровой сеймостанцией «ЭЛЛИСС-3».

Таблица 2.1 – Расчетные значения физико-литологических параметров грунтов в пункте ПРТ.

СП/ПП, м	Мощность слоя, м	$V_P$ , м/с	$V_S$ , м/с	$V_S/V_P$	$W$ , %	$\rho$ , г/см <sup>3</sup>	$\eta$ , %
1/0	2.7	350	201	0.57	26.98	1.71	53.11
	4.1	694	446	0.64	16.14	1.93	50.50
	3.2	1393	505	0.36	УГВ	2.15	39.89
6/10	2.8	323	169	0.52	27.83	1.68	53.24
	3.7	684	406	0.59	16.45	1.92	50.60
	3.5	1419	507	0.36	УГВ	2.16	39.36
12/22	1.8	228	127	0.56	30.82	1.61	53.62
	4.5	648	372	0.57	17.59	1.89	50.95
	3.7	1441	477	0.33	УГВ	2.16	38.90
18/34	2.2	314	207	0.66	28.11	1.69	53.28
	6.3	624	379	0.61	18.34	1.89	51.17
	1.5	1157	464	0.40	УГВ	2.08	44.27
24/46	2.3	366	281	0.77	26.47	1.74	53.03
	1.6	625	393	0.63	18.31	1.89	51.16
	6.1	1201	482	0.40	УГВ	2.10	43.51

Примечание –  $V_P$ ,  $V_S$  – скорость продольных и поперечных волн;  $W$  – влажность;  $\rho$  – плотность;  $\eta$  – пористость.

Были получены скорости распространения продольных ( $V_P$ ) и поперечных волн ( $V_S$ ), определены соответствующие им границы слоев и их мощность, уровень грунтовых вод, проведен расчет физико-литологических свойств грунтов.

По скоростным границам в пункте ИНС выделяются два слоя:

1) почвенно-пирокластический чехол мощностью 1–3.3 м, с диапазоном скоростей поперечных волн  $V_S = 106–172$  м/с и продольных волн  $V_P = 190–224$  м/с.

2) переотложенные обвально-взрывные отложения, их мощность может составлять до 20–23 м, с диапазоном скоростей поперечных волн  $V_S = 375–428$  м/с и продольных волн  $V_P = 465–591$  м/с.

3) по скоростям продольных волн определен уровень грунтовых вод (УГВ),  $h = 7–8$  м.

Следует отметить, что удельная активность  $^{226}\text{Ra}$ , измеренная с помощью сцинтилляционного гамма-спектрометра, в первом слое ничтожно мала ( $A_{226\text{Ra}} \approx 10$  Бк/кг), поэтому почвенно-пирокластический чехол можно рассматривать только как зону транзита без выделения Rn. Миграция Rn в первых двух слоях осуществляется за счет адвекции и диффузии. Согласно представлениям о миграции Rn в грунте с полным влагонасыщением, поток газов в форме микропузырьков является основным механизмом транспортирования Rn к дневной поверхности [Varhegyi et al., 1986; Бондаренко, Иванова, 1999; Etiope, Martinelli, 2002].

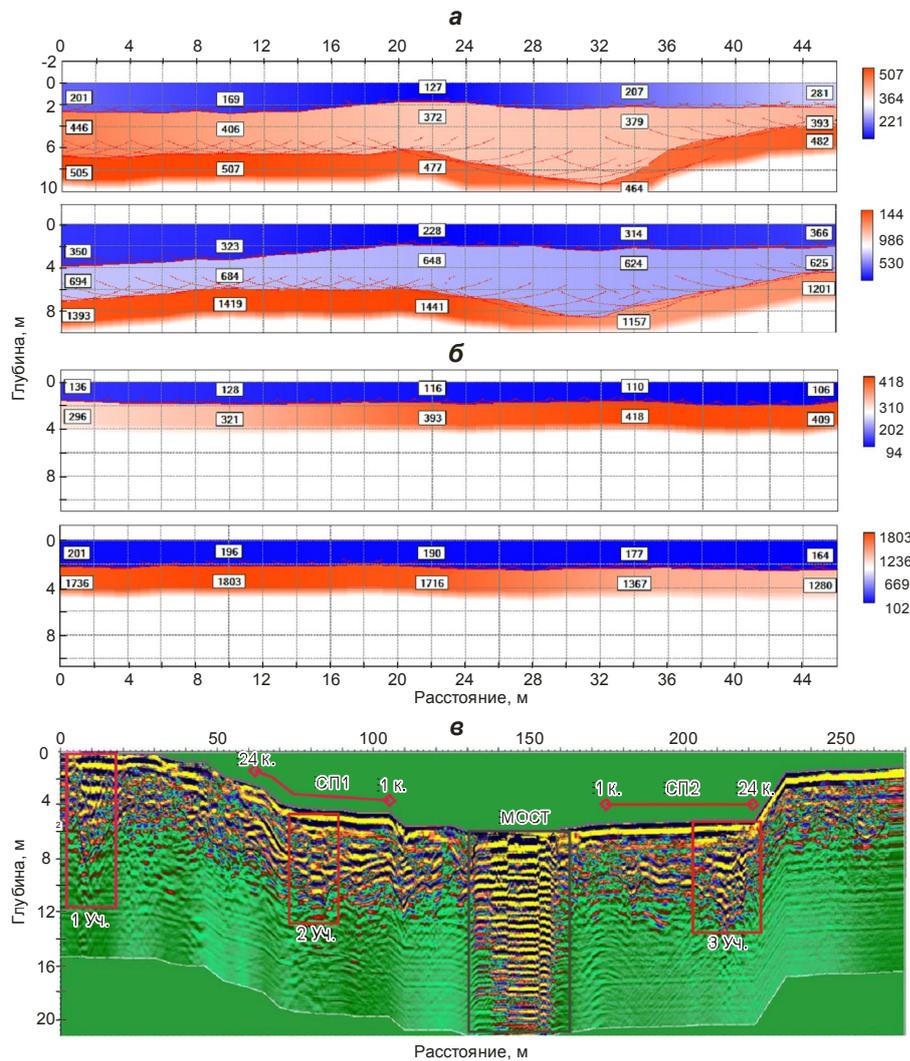


Рисунок 2.11 – Скоростные разрезы  $S$ - и  $P$ -волн в районе пункта ПРТ:  $a$  – СП1,  $b$  – СП2;  $в$  – георадиолокационный профиль в пункте ПРТ. Квадратами выделены предполагаемые зоны дизъюнктивных нарушений.

При этом механизм миграции эндогенных газов определяется взаимодействием воды в порах и трещинах с породой. Согласно современным исследованиям на глубинах в несколько тысяч метров пузырьки имеют диаметр  $10^{-2} \div 10^{-10}$  мм. При этом предполагается, что газы-транспортеры ( $H_2$ ,  $CO_2$  и  $CH_4$ ), находящиеся в нескольких состояниях (течение в газовой фазе, вытеснение воды газом, газовые пробки и пузыри), обеспечивают основной процесс миграции более тяжелых инертных газов ( $He$ ,  $Rn$ ).

Различия в отклике пунктов на подготовку сильных землетрясений связаны с наличием как вертикальных, так и горизонтальных неоднородностей верхнего слоя грунта, а так же уровнем грунтовых вод и расположением пунктов в различных структурных элементах побережья Авачинского залива [Фирстов, Макаров, Глухова, 2017а]. Кроме того зоны разуплотнений, выступающие в роли проводящих коллекторов, способствуют миграции подпочвенных газов с больших глубин.

Опорный пункт ПРТ функционирует 100% времени существования сети. Пункт ИНС функционирует около 70%, пункты ЛВЧ, НЛЧ около 58%, пункт КРМ – 58%, пункт ПРТ1 – 53%, пункт МРЗ – 5%, КРК около 16%. Около 90% времени функционируют одновременно два и более пунктов сети.

## **2.5. Сбор, хранение и обработка временных рядов данных концентрации подпочвенных газов и метеорологических величин**

Результатом непрерывной работы оборудования на пунктах сети мониторинга концентрации подпочвенных газов Петропавловск-Камчатского геодинамического полигона является информация с дискретностью 10 минут о большом числе регистрируемых параметров. Для ее надежного хранения и удобного доступа с целью последующей обработки используются две специализированные информационные системы (ИС). ИС «Полигон», представляющая собой комплекс программных средств для сбора, хранения и обработки данных геофизических наблюдений КФ ЕГС РАН [Копылова и др., 2003], а также система сбора данных с пунктов сети, разработанная в лаборатории АРМ КФ ЕГС РАН. Она позволяет автоматизировать сбор данных с пунктов сети мониторинга в режиме, близком к реальному времени. Блок схема системы сбора данных, показана на рисунке 2.12.

Информация накапливается в памяти регистрирующего устройства ALMEMO в составе РКПГ, а затем по различным каналам связи собирается в базу данных мониторинга подпочвенных газов. Одновременно со сбором данных выполняется синхронизация системного времени и управление ALMEMO.

В зависимости от информационно-сетевой инфраструктуры в месте расположения пункта, съем данных с РКПГ может осуществляться различными способами. Часть пунктов сети, имеющих возможность соединения с сетью ethernet КФ ЕГС РАН подключена через COM-порт ALMEMO, с которого данные поступают на преобразователь пользовательских интерфейсов MOXA NPort-5210A, способный работать в широком диапазоне температур  $-40 \div +75$  °С. Далее по сети ethernet КФ ЕГС РАН текущая информация передается на сервер сбора данных лаборатории АРМ, где происходит ее запись в базу мониторинга подпочвенных газов. Информация в базе данных обновляется регулярно и визуализируется на автоматизированном рабочем месте оператора.

С несколькими, территориально удаленными пунктами, связь осуществляется по каналам сети GSM с помощью специализированных модемов ZA-1709-GS, что позволяет получать данные и управлять регистратором ALMEMO в сеансном режиме.

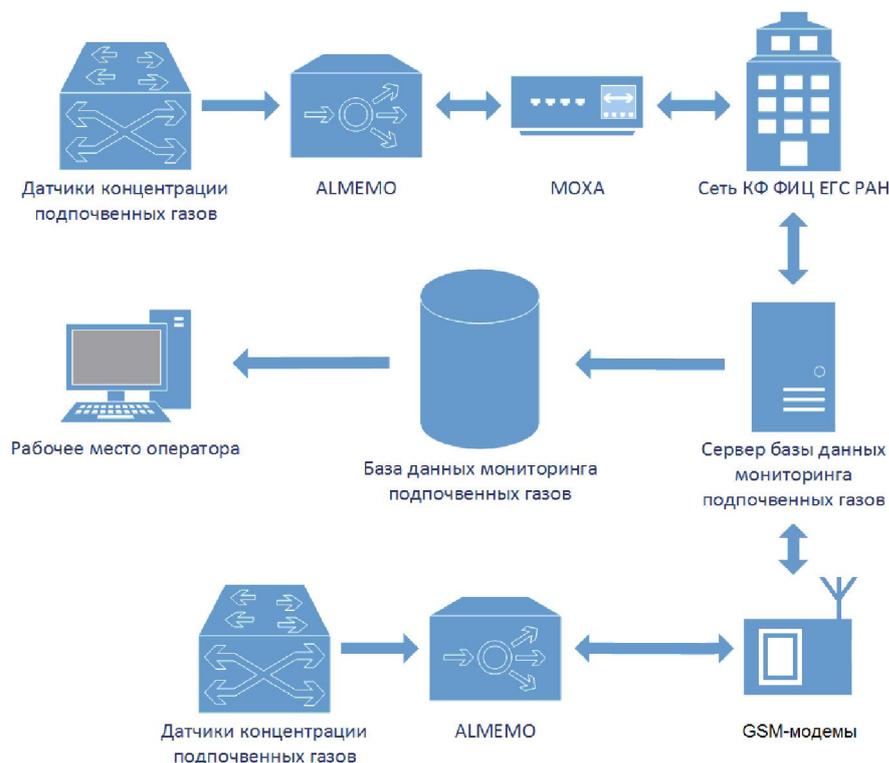


Рисунок 2.12 – Блок-схема работы системы сбора, хранения и обработки данных с пунктов сети мониторинга концентрации почвенных газов.

Все поступающие данные перед загрузкой в базу проходят этап предварительной обработки для придания единства их формату. Для обеспечения надежности хранения накопленной информации регулярно в автоматическом режиме производится резервное архивирование всей базы данных.

После выгрузки информации из базы данных ее последующая обработка выполняется наиболее удобными для этих целей программными продуктами, такими как пакет обработки сигналов (ПОС) НПП «МЕРА» [ПОС, Руководство пользователя, 1995] и пакета программ для сопровождения и анализа данных геофизического мониторинга WinABD [Дещеревский и др., 2016].

Для сопоставления вариаций  $OA$   $R_n$  с сейсмичностью Камчатского региона использовались оперативные каталоги землетрясений КФ ЕГС РАН и Национального центра информации о землетрясениях (National Earthquake Information Center (NEIC)), являющегося частью Геологической службы США (U.S. Geological Survey). Использовались следующие оценки энергии сейсмических событий:  $K_S = \lg E$ , Дж, энергетический класс по С.А. Федотову [Федотов, 1972]; моментная магнитуда  $M_W$  по каталогу NEIC.

Для контроля атмосферных процессов использовались собственные данные, а так же архив КФ ЕГС РАН оперативных метеорологических данных с метеостанции, расположенной на сейсмической станции «Карымшина» (температура, давление, направление и скорость ветра, количество осадков). Влияние вариаций атмосферного давления на ОА Rn учитывалось с помощью методики компенсации баровариаций [Любушин, 2007].

Аномалии в радоновом поле выделялись на основании эмпирического многолетнего опыта по их характерным формам, известным из литературных источников: бухтообразные, положительной или отрицательной полярности; резкие сбросы; тренды.

Для каждой выделенной аномалии оценивались следующие параметры (рисунок 1.4):

$$\delta\% = \left( \frac{A_{ан} - A_{фон}}{A_{фон}} \right) \cdot 100 - \text{относительная амплитуда аномалии};$$

$t_{упр}$  – время упреждения;

$t_{ан}$  – длительность аномалии.

В дальнейшем, с целью автоматизированного выделения предвестниковых аномалий, запланирована разработка программы, которая на основании методики айгеноскопии с использованием временных рядов из базы данных будет выделять реперные точки коллективного поведения в многомерном ряду концентрации подпочвенных газов, которые могут служить в качестве прогностического признака сильных землетрясений Южной Камчатки [Фирстов, Исакевич, Макаров и др., 2014].

## 2.6. Оценка плотности потока радона с поверхности с помощью накопительной камеры

При организации пунктов мониторинга подпочвенного радона с целью расширения сети необходимо знать величину плотности потока радона с поверхности (ППР) в выбранной точке, где будет устанавливаться накопительная камера. ППР качественно определяет тензочувствительность выбранной точки, зависящую от ОА Rn и конвективной скорости его переноса. Для зон динамического влияния разлома (ЗДВР) характерны участки разуплотнений с повышенным стоком Rn, наиболее приемлемые для установки датчиков и являющиеся чувствительной областью, реагирующей на изменения напряженно-деформированного состояния геосреды [Фирстов, Макаров, Акбашев, 2015]. Все это определяет необходимость оперативной оценки ППР простым и доступным методом.

Накопление в замкнутой камере при стационарном поступлении Rn, представляет собой процесс с выходом на насыщение при достижении его равновесия с продуктами распада. При этом

выход значения ОА Rn на равновесие определяется ППР и кратностью воздухообмена (КВО) в условиях, когда отсутствуют резкие изменения вентиляции камеры. Для оценки этих параметров использовано математическое описание процесса изменения ОА Rn во времени, согласно подходу из работы [Vasilyev, Zhukovsky, 2013].

С допущением, что радон перемешивается мгновенно по всему объему, временная зависимость ОА Rn  $A(t)$  в камере может быть представлена в виде дифференциального уравнения первого порядка:

$$\frac{dA(t)}{dt} = S(t) - (A(t) - A_{Rn}^{amm}) \cdot \lambda_v(t) - (A(t) - A_{Rn}^{amm}) \cdot \lambda_{Rn}, \quad (2.1)$$

где  $S(t)$  – функция, описывающая суммарное удельное поступление Rn в единичный объем камеры (скорость поступления), Бк/(м<sup>3</sup>·ч);  $\lambda_v(t)$  – функция, описывающая зависимость значения КВО от времени, ч<sup>-1</sup>;  $\lambda_{Rn} = 0.00755$  ч<sup>-1</sup> – постоянная распада радона;  $A_{Rn}^{amm}$  – концентрация радона в наружном воздухе, Бк/м<sup>3</sup>.

Общее решение уравнения представлено в работе [Vasilyev, Zhukovsky, 2013]. Там же отмечено, что, поскольку даже полностью закрытое помещение имеет КВО в стационарном режиме эксплуатации на уровне, по крайней мере,  $0.05$  ч<sup>-1</sup>, что много больше постоянной распада, то третьим членом уравнения (2.1) можно пренебречь. Постоянная  $A_{Rn}^{amm}$  также не учитывалась, так как средняя концентрация радона в наружном воздухе много меньше концентрации, накапливающейся в исследуемом объеме. Для оценки ППР в накопительной камере сделаны аналогичные допущения.

Процесс накопления Rn в камере является стационарными, когда отсутствуют резко меняющиеся условия КВО и ППР с поверхности под ней постоянна, следовательно  $\lambda_v(t)$  и  $S(t)$  являются постоянными величинами.

Суммарная скорость поступления радона  $S$  обусловлена двумя основными механизмами: диффузионным и конвективным  $S = S_D + S_C$ , где  $S_D$  и  $S_C$  соответственно скорости диффузионного и конвективного поступления радона в накопительную камеру, Бк/(м<sup>3</sup>·ч) [Крисюк, 1989]. Так как в камере отсутствуют условия создания значительного конвективного потока подпочвенного воздуха с поверхности под ней, скорость конвективного поступления Rn в камеру приравнена к нулю. Скорость диффузионного поступления радона  $S_D = (q \cdot \Pi) / V$ , где  $V$  – объема накопительной камеры, м<sup>3</sup>;  $\Pi$  – площадь натекания под ней, м<sup>2</sup>;  $q$  – ППР, мБк/(м<sup>2</sup>·с).

Процесс накопления обусловлен постоянными  $S_D$  и КВО с выходом на насыщение:  $A_{\max} = S_D / \lambda_0$ , Бк/м<sup>3</sup>.

С учетом принятых допущений решение уравнения (2.1):

$$A(t) = A_{\max} \cdot (1 - e^{-\lambda_0 \cdot t}) + A_0 \cdot e^{-\lambda_0 \cdot t}, \quad (2.2)$$

где  $\lambda_0$  – постоянный КВО при стационарном режиме накопления в емкости,  $\text{ч}^{-1}$ ;  $A_0$  – ОА Рп в начальный момент времени  $\text{Бк}/\text{м}^3$ .

На основании (2.2), с учетом средней по пяти первым значениям экспериментальной  $A_0$ , рассчитывался ряд модельных кривых с различными значениями  $\lambda_0$ , из которых по максимуму коэффициента корреляции с экспериментальными (0.93-0.99) выбиралась наиболее подходящая. Время выхода экспериментальных кривых на насыщение оценивалось по достижению минимума мгновенной скорости накопления Рп. Исходя из подобранных значений  $\lambda_0$  с учетом  $V = 0.01 \text{ м}^3$  и  $\Pi = 0.05 \text{ м}^2$  для используемых камер, а также осредненной в окнах от получаса до двух часов  $A_{\text{max}}$  экспериментальных кривых, были рассчитаны ППР для четырех пунктов мониторинга подпочвенных газов по формуле:

$$q = (A_{\text{max}} \cdot \lambda_0 \cdot V) / \Pi, \quad (2.3)$$

Результаты расчетов ППР на опорном пункте ПРТ (Паратунка) для трех одновременно установленных на глубине один метр в зоне аэрации накопительных камер в точке ПРТ\_1 (рисунок 2.13, ПРТ\_1, датчики №1-3), а также для двух датчиков с различным заглублением в пунктах ПРТ\_3 (рисунок 2.13, ПРТ\_3, датчики №1, 2), МРЗ и ГЛЛ приведены в таблице 2.2. Расчетные и экспериментальные кривые приведены на рисунке 2.14. Все пункты располагались в речных долинах на аллювиально-делювиальных отложениях.

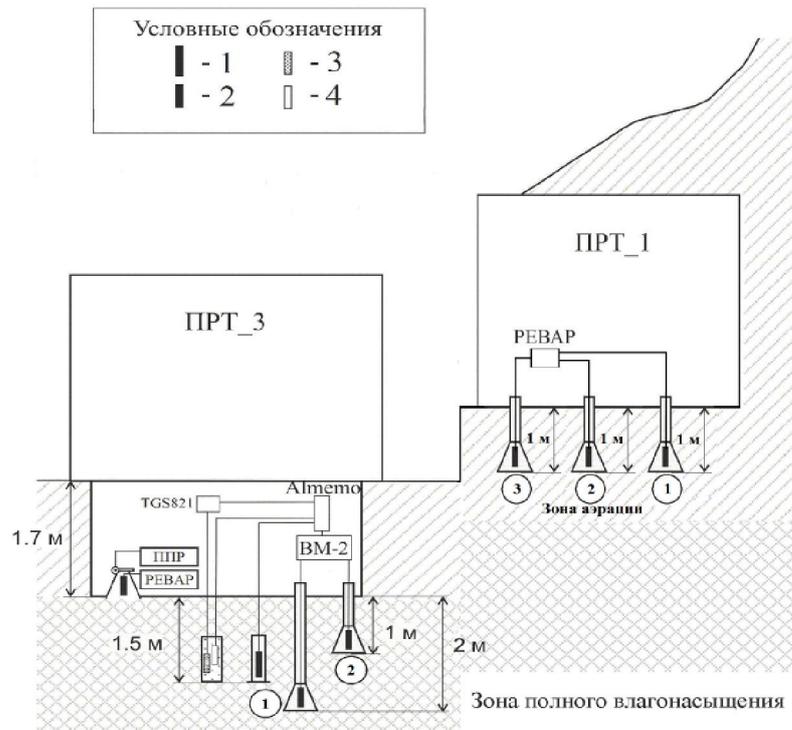


Рисунок 2.13 – Схема размещения датчиков для регистрации концентрации подпочвенных газов в опорном пункте ПРТ.

1 – датчик  $\gamma$ -излучения; 2 – газоразрядные счетчики  $\beta$ -излучения; 3 – датчик  $\text{H}_2$ ; 4 – датчик  $\text{CO}_2$ . Номерами в кружках выделены газоразрядные счетчики согласно таблице 2.2.

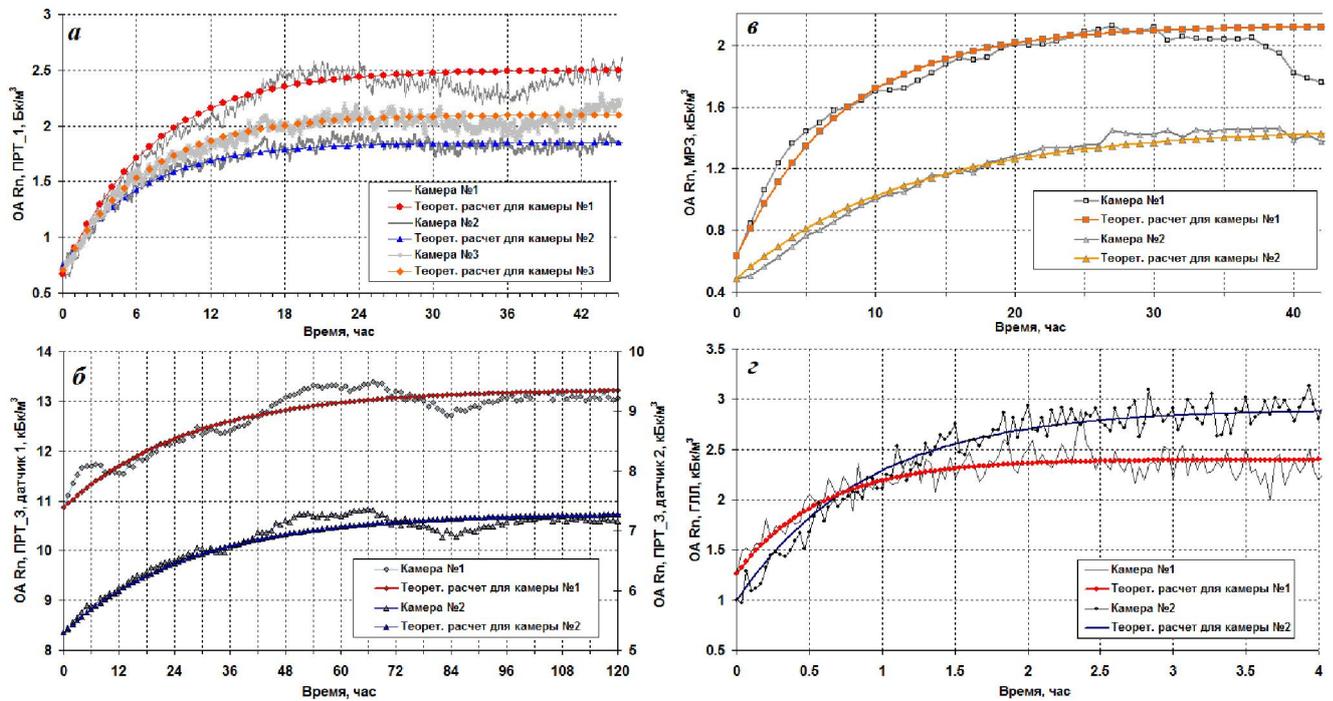


Рисунок 2.14 – Расчетные кривые накопление Rn в камере с параметрами, обеспечивающими удовлетворительное совпадение с экспериментальными кривыми.

*a, б* – пункт ПРТ, *в* – пункт МРЗ, *z* – пункт ГЛЛ. Схема расположения пунктов показана на рисунке 2.1.

Таблица 2.2 – Экспериментальные и расчетные данные накопления ПР в камерах.

№	Пункты	Экспериментальные данные				Расчетные значения			Характеристика грунтов в месте установки счетчиков
		<i>h</i> , м	<i>T</i> , час	$A_0$ , кБк/м <sup>3</sup>	$A_{max}$ , кБк/м <sup>3</sup>	$S$ , Бк/(м <sup>3</sup> ·с)	КВО, 1/ч	ППР, мБк/м <sup>2</sup> ·с	
1	ПРТ_1, к.1	1	26.5	0.7	2.5	0.09	0.140	19.8±1.2	ЗДВ ручья Коркина, точка на левом склоне, камеры устанавливались на глубине метр от поверхности
2	ПРТ_1, к.2	1	24	0.7	1.9	0.08	0.160	16.8±1.1	
3	ПРТ_1, к.3	1	25	0.7	2.1	0.09	0.150	17.9±1.3	
4	ПРТ_3, к.1	2	74	10.9	13.2	0.13	0.036	27.0±1.1	Камеры устанавливались в бункере глубиной 1.7 м
5	ПРТ_3, к.2	1	74	5.3	7.3	0.07	0.036	14.9±1.1	
6	МРЗ, к.1	1	27	0.6	2.1	0.08	0.130	15.7±0.6	Долина ручья
7	МРЗ, к.2	0.2	39	0.5	1.5	0.03	0.080	6.6±0.4	
8	ГЛЛ, к.1	0.9	2.4	1.3	2.4	0.02	0.028	3.8±0.9	Долина реки Паратунка
9	ГЛЛ, к.2	1.8	3.3	1.0	2.9	0.01	0.019	3.1±0.8	

Примечание – *h* – глубина установки накопительной камеры;  $A_0$  – начальное значение *OA Rn*;  $A_{max}$  – максимальное значение *OA Rn*; *S* – скорость диффузионного поступления *Rn*; КВО – кратностью воздухообмена; ППР – плотность потока *Rn*; *T* – время выхода на насыщение.

Данная методика в первом приближении дает возможность оценить величину ППР в точке установки накопительной камеры. В некоторых случаях такие оценки можно проводить неоднократно, удаляя Rn и его дочерние продукты распада из камеры путем принудительного вентилирования. Полученные значения ППР на глубинах два  $q_2 = 27 \pm 1.1$  мБк/(м<sup>2</sup>·с) и один метр  $q_1 = 14.9 \pm 1.1$  мБк/(м<sup>2</sup>·с) в точке ПРТ\_3 согласуются со значением  $q_0 = 9.2 \pm 3.1$  мБк/(м<sup>2</sup>·с) при одновременной регистрации ППР с поверхности грунта в данной точке сертифицированным прибором "Прогресс-2000", так как в процессе миграции Rn к поверхности его ППР уменьшается за счет радиоактивного распада. Прямое сравнение на глубинах 1 и 2 метра не выполнялось в связи с особенностями сертифицированной методики.

## 2.7. Влияние вариаций метеорологических величин на динамику подпочвенного радона

Влияние вариаций метеорологических величин (атмосферное давление, температура воздуха) на динамику подпочвенного Rn отмечалось в первых работах по эманационной съемке и в дальнейшем исследовалось в работах многих исследователей [Баранов, 1956; Бондаренко и др., 1999; Рудаков, 1985; Klusman, Webster, 1988; Фирстов, Рудаков, 2003; Фирстов и др., 2007; Inan et al., 2008; Sedat et al., 2008; Chege et al., 2009; Attanasio et al., 2012; Sturrock et al., 2017]. В этих работах показаны причины влияния вариаций атмосферного давления и температуры воздуха на эксхалляцию радона из рыхлых однородных отложений.

Как правило, процесс массопереноса газов в рыхлых отложениях описывается «уравнением газовой атаки», в котором фигурирует как диффузионный член, так и конвективный (адвективный) член, соответствующий свободному течению. Сезонный ход температуры воздуха сильно влияет на эксхалляцию радона в широтах с отрицательной температурой воздуха в зимний период. Также в зависимости от влажности грунта в местах установки датчиков, передаточная функция атмосферное давление – ОА Rn может значительно различаться даже для отложений одного генезиса.

*Сезонный ход в динамике ОА Rn и его связь с температурой воздуха.* В работе [Фирстов, Рудаков, 2003] был рассмотрен сезонный ход динамики подпочвенного Rn за период 1998÷2000 гг. для некоторых пунктов сети. Диссертантом была продолжена работа в этом направлении. Рассматривался сезонный ход ОА Rn за период 2010÷2012 гг. для пункта ПРТ (рисунок 2.15), и за период 2013÷2015 гг. для пункта ИНС.

Для построения сезонных кривых данные для пунктов ПРТ и ИНС усреднялись по полусуточным интервалам, а затем сглаживались скользящим средним в недельном окне

(рисунок 2.15а,б; 2.16а,б). Таким же образом строились кривые вариации температуры воздуха на годовых интервалах (рисунок 2.15в, 2.16в). Для обоих пунктов визуально просматривается хорошо выраженный сезонный ход, который связан с температурой воздуха и сезонными колебаниями уровня грунтовых вод.

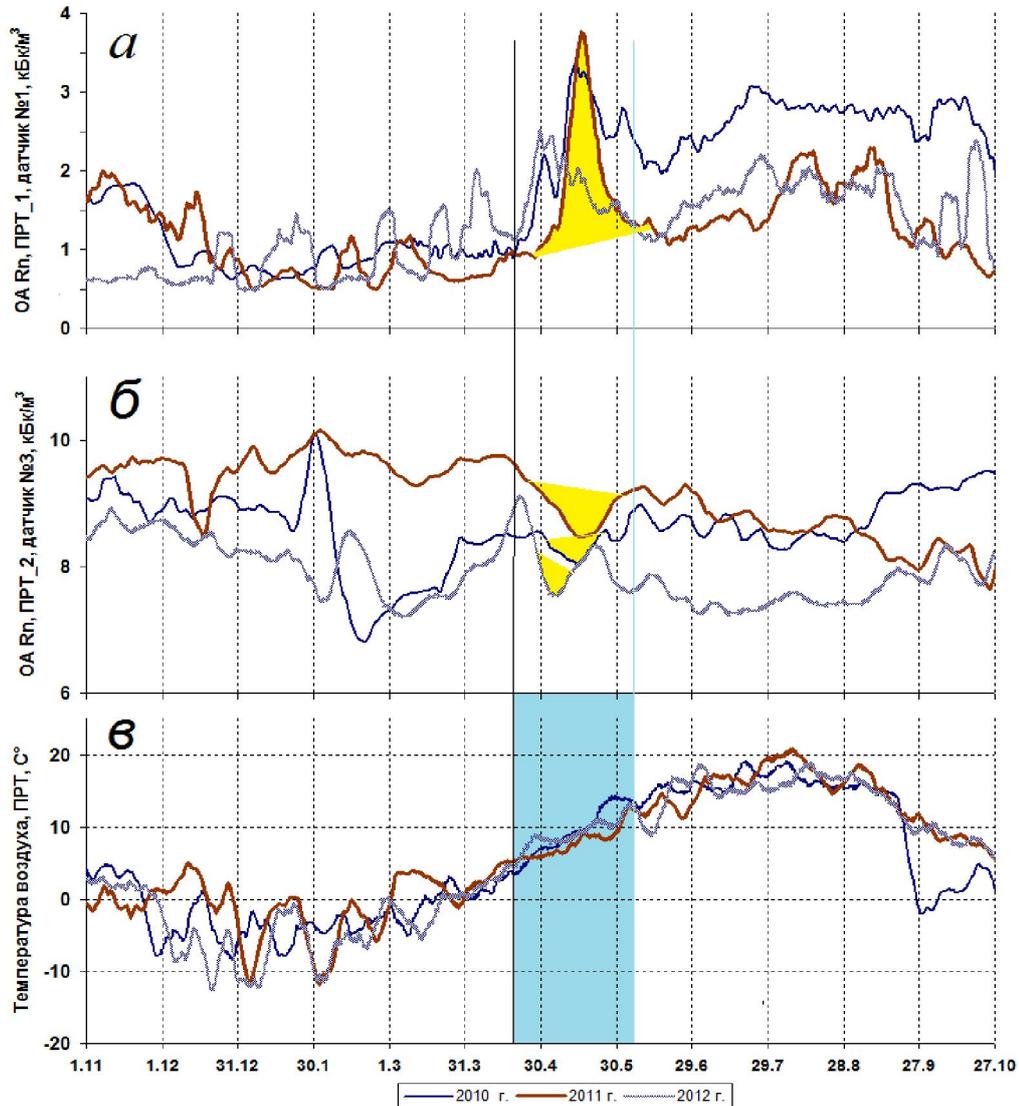


Рисунок 2.15 – Сезонный ход  $OA R_n$  в пункте ПРТ и сезонный ход температуры воздуха за период с 01.11.2009 г. по 27.10.2012 г.: а – датчик ГС1, зона аэрации; б – датчик ГС3, зона влагонасыщения; в – температура воздуха.

Поведение кривых сезонного хода для датчиков в зоне аэрации в обоих пунктах близко, но кривая для датчика ГС3<sub>ПРТ</sub>, расположенного в зоне влагонасыщения, отличается формой и вариабельностью. Если отношение  $R_{n_{max}}/R_{n_{min}}$  для ГС1<sub>ПРТ</sub>, составляет 5.2-7.8, то, для датчика ГС3<sub>ПРТ</sub> не более 1.3-1.5.

В целом, как и ранее [Фирстов, Рудаков, 2003] в сезонном ходе подпочвенного  $R_n$  выделяются три временных периода: I – осенне-зимний (октябрь-середина апреля); II –

весенний (конец апреля-май); III – летний (июнь-сентябрь), которые связаны с сезонным ходом температуры воздуха и уровнем грунтовых вод

При уменьшении температуры воздуха ниже нуля в осенне-зимний период происходит промерзание верхнего слоя грунта, которое ведет к уменьшению его проницаемости и, соответственно, к уменьшению ОА Rn в зоне аэрации за счет уменьшения конвективной составляющей (рисунок 2.15а, рисунок 2.16а,б). В зоне полного влагонасыщения за счет уменьшения конвективной составляющей происходит незначительное увеличение ОА Rn (рисунок 2.15б).

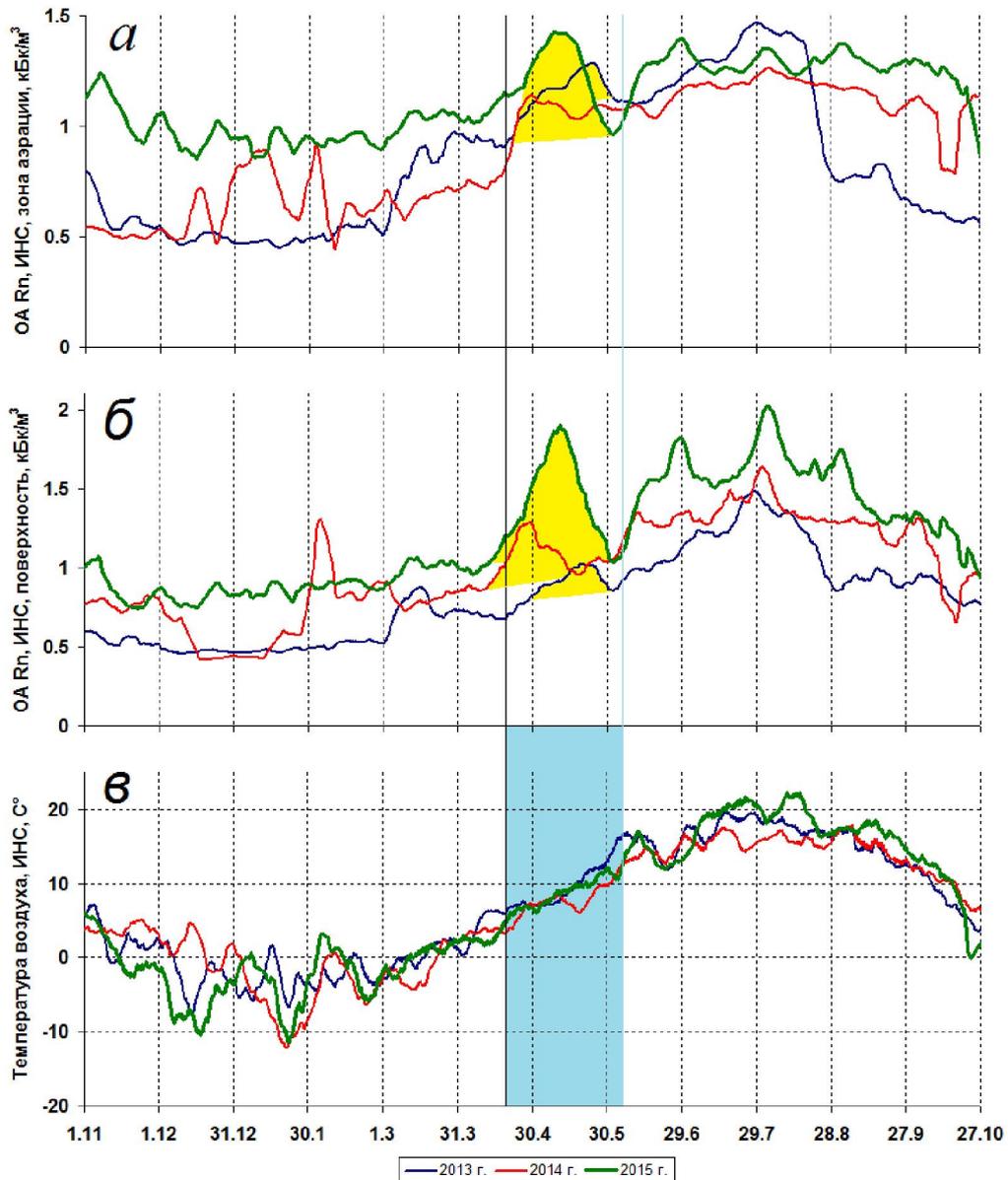


Рисунок 2.16 – Сезонный ход ОА Rn а пункте ИНС и сезонный ход температуры воздуха за период с 01.11.2012 г. по 27.10.2015 г.: а – зона аэрации; б – датчик на поверхности пола бункера (см. рисунок 2.9); в – температура воздуха.

Весной, после повышения температуры воздуха до плюсовых значений, за счет таяния обильного снежного покрова на Камчатке поднимается уровень грунтовых вод. В этот период в зоне влагонасыщения наблюдается уменьшение концентрации  $R_n$  на 20÷25% и увеличение концентрации  $R_n$  до 200% и более в зоне аэрации.

Резкое падение уровня грунтовых вод приводит к уменьшению открытой поверхности зоны влагонасыщения (эффект «засасывания»), что приводит к перемещению столба атмосферы в рыхлых отложениях зоны аэрации и резкому уменьшению ОА  $R_n$  в зоне аэрации и увеличению его в зоне влагонасыщения.

Летний период характеризуется прогревом верхнего слоя почвы и увеличением его проницаемости и уменьшением градиента ОА  $R_n$  с глубиной.

***Отклик в динамике ОА  $R_n$  на вариации атмосферного давления.*** Влияние метеорологических параметров на динамику подпочвенного радона для некоторых пунктов сети радонового мониторинга исследовалось ранее на достаточно ограниченном материале [Фирстов, Рудаков, 2003]. Диссертантом были продолжено изучение зависимости динамики ОА  $R_n$  от атмосферного давления на временных рядах, полученных в последующие годы.

С помощью программы WinPOS (НПП «Мера»), вычислялись квадрат модуля спектра когерентности ( $\gamma^2$ ) и амплитудно-частотная передаточная функция (Н) между концентрацией  $R_n$  и атмосферным давлением для пунктов ПРТ, ИНС и КРМ (рисунок 2.17, рисунок 2.18). Для временных рядов, полученных с датчиков в зоне аэрации (ГС1<sub>ПРТ</sub>) и в воздухе (ГС2<sub>ПРТ</sub>) пункта ПРТ (см. рисунок 2.7) в передаточной функции Н четко выделяются максимумы на частотах один цикл/сутки и на второй и третьей ее гармониках как для 2006 г., так и для 2010 г. Для зоны полного влагонасыщения (ГС3<sub>ПРТ</sub>) влияние суточных колебаний атмосферного давления незначительно. Следует отметить, что для этого канала Н в диапазоне частот 0.1÷0.5 цикл/сутки в 2010 г. значительно больше, чем в 2006 г. Не исключено, что это определяется изменениями напряженно – деформированного состояния блока геосреды места расположения пункта ПРТ. Максимум  $\gamma^2$  для всех трех датчиков заключен в диапазоне 0.15÷0.5 цикл/сутки и иллюстрирует влияние вариаций атмосферного давления, сопровождающих циклоны.

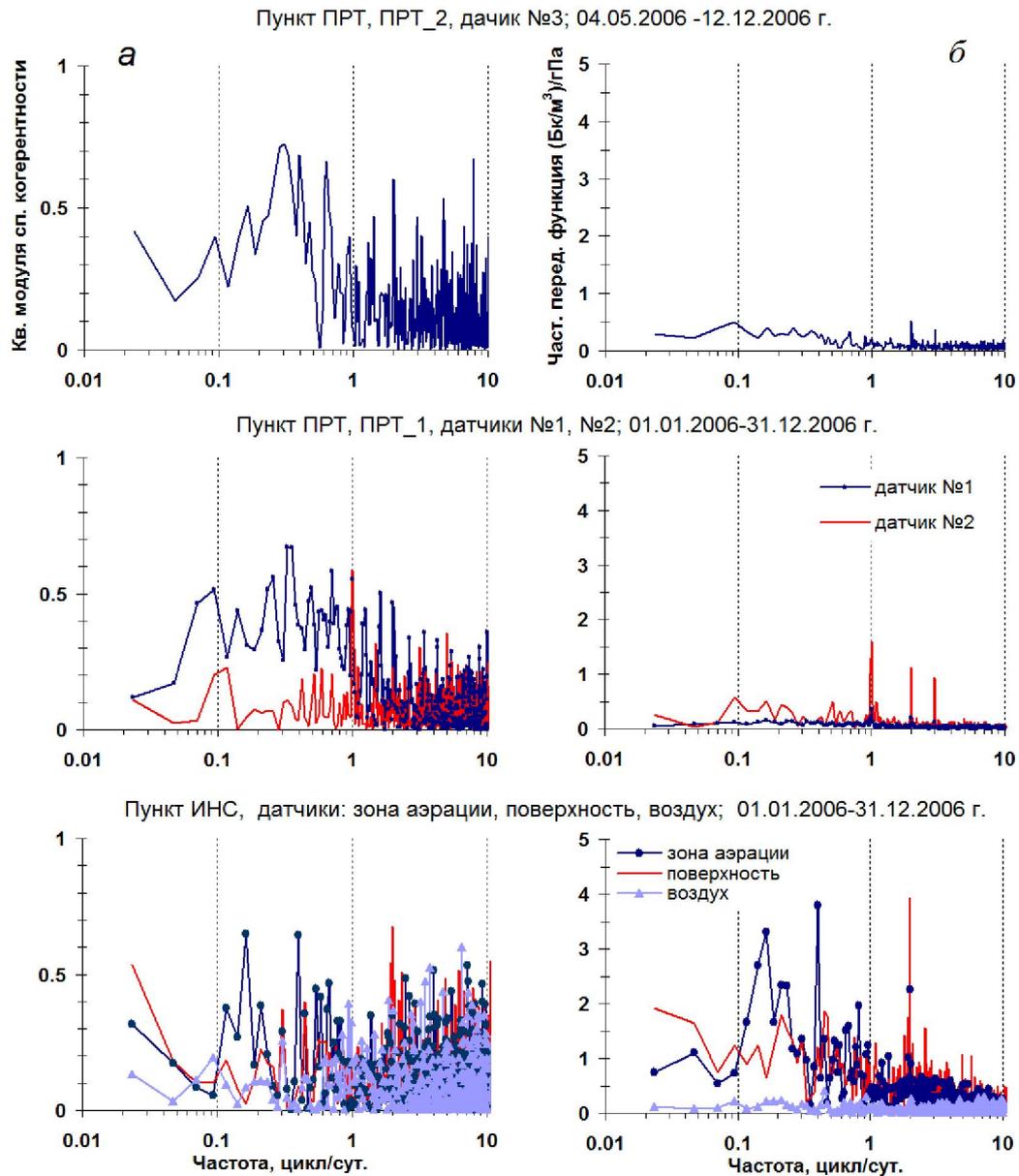


Рисунок 2.17 – Квадрат модуля спектра когерентности (*a*) и амплитудно-частотная передаточная функция между атмосферным давлением и ОА Rn (*б*) для пунктов ПРТ и ИНС в 2006 г.

Для пункта ИНС для всех трех датчиков характер поведения  $\gamma^2$  и  $H$  отличается от поведения этих параметров пункта ПРТ. Наблюдается существенное влияние атмосферного давления на ОА Rn в полусуточном интервале, что обусловлено особенностями конструкции этого пункта наблюдений [Фирстов и др., 2007; Макаров и др., 2012]. Для пункта КРМ существенного влияния атмосферного давления на концентрацию Rn не наблюдается.

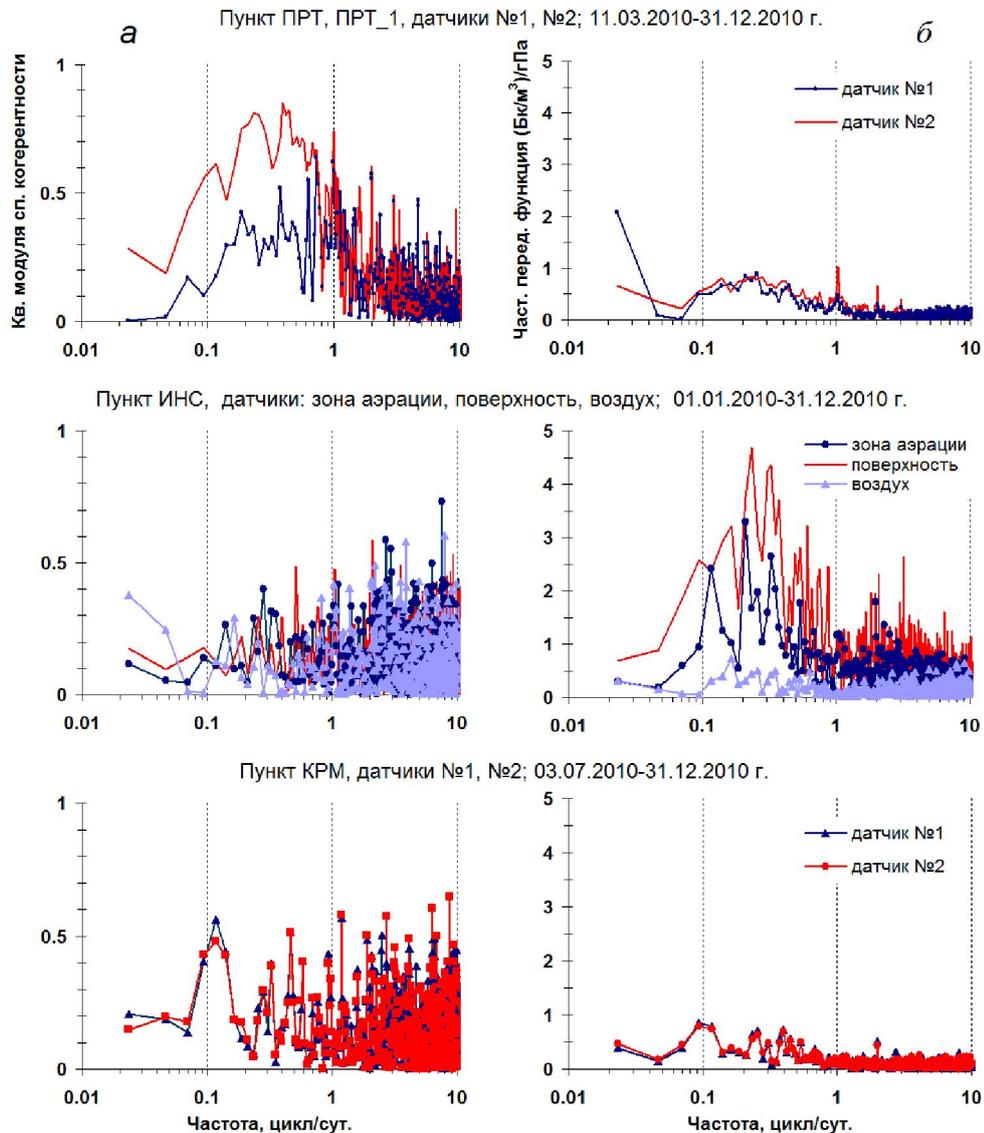


Рисунок 2.18 – Квадрат модуля спектра когерентности (а) и амплитудно-частотная передаточная функция между ОА Rn и атмосферным давлением (б) для пунктов ПРТ, ИНС, КРМ в 2010 г.

Характерный пример влияния циклонической активности на динамику подпочвенного радона в пункте ПРТ показан на рисунке 2.19а. В зоне аэрации (ГС1<sub>ПРТ</sub>) визуально хорошо просматривается зависимость величины ОА Rn от вариаций атмосферного давления, обусловленных циклонами. В то время как для датчика ГС3<sub>ПРТ</sub>, который расположен в зоне полного влагонасыщения, зависимость ОА Rn от атмосферного давления практически не выражена (рисунок 2.19б).

При анализе временных рядов ОА Rn, с целью выделения предвестниковых аномалий сильных землетрясений, выполнялась их барокомпенсация по методике, описанной в работе [Любушин, 2007]. Для участка кривой ОА Rn длительностью два месяца датчика ГС1<sub>ПРТ</sub> (рисунок 2.19а), относительная амплитуда вариаций, связанных с атмосферным давлением,

после барокомпенсации уменьшилась в среднем на 85%. До компенсации  $\delta_{\max}=240\%$ , а  $\delta_{\min}=94\%$ , после компенсации  $\delta_{\max} = 97\%$ , а  $\delta_{\min}=6.5\%$ .

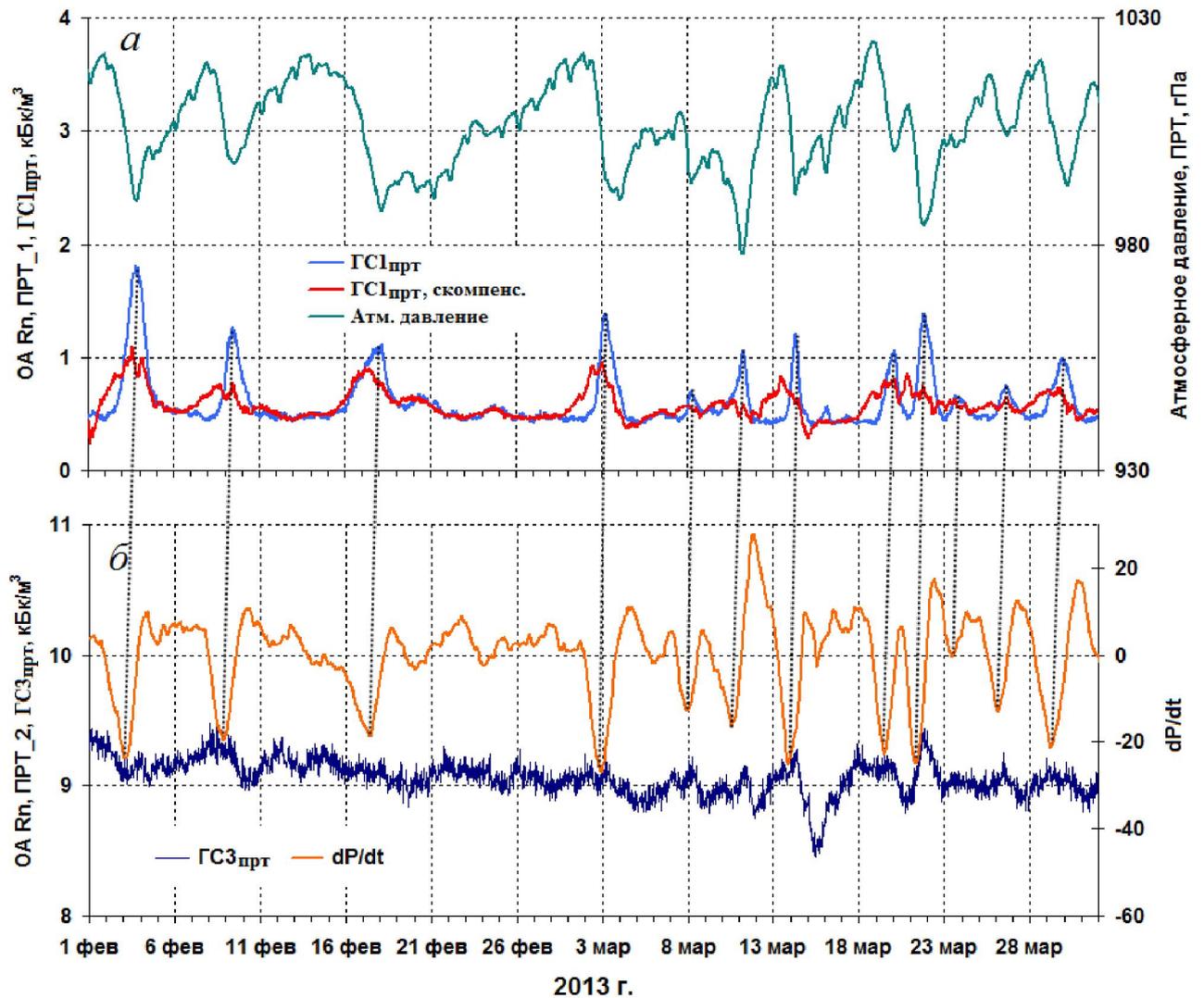


Рисунок 2.19 – Атмосферное давление, исходная и барокомпенсированная кривые OA Rn в зоне аэрации (ГС1<sub>прт</sub>) пункта ПРТ (а); кривая OA Rn зоны влагонасыщения (ГС3<sub>прт</sub>) и мгновенная скорость изменения атмосферного давления  $dP/dt$ , гПа/с (б).

Как видно на рисунке 2.19б, резкие пики возрастания OA Rn на кривой для ГС1<sub>прт</sub> имеют стопроцентную синхронизацию с отрицательными пиками на кривой мгновенной скорости изменения атмосферного давления ( $dP/dt$ ). Причем наблюдается запаздывание в 14 часов, с максимумом коэффициента кросскорреляции  $-0.8$ , OA Rn относительно  $dP/dt$ . Это запаздывание связано со временем обмена зоны аэрации с атмосферой и характеризует скорость распространения вариаций атмосферного давления на глубину один метр.

С учетом недостаточной барокомпенсации рядов OA Rn селекция предвестниковых аномалий землетрясений, в первую очередь, осуществлялась на основании синфазных возмущений OA Rn на нескольких пунктах регистрации. Но, в некоторых случаях

предвестниковые аномалии регистрировались только на одном пункте. Для расчета относительной амплитуды  $\delta$  в качестве фона принималось среднее значение ОА Rn за несколько суток до момента возникновения аномалии, так как после землетрясений в поле подпочвенного радона возможны косейсмический эффект и постсейсмический отклик.

## 2.8. Выводы к главе 2

Сеть пунктов мониторинга концентрации подпочвенных газов на Петропавловск-Камчатском геодинамическом полигоне является уникальной. Она работает в той или иной конфигурации в течение 20 лет без больших пропусков информации. В настоящее время в результате решения задачи по модернизации сети, она оснащена современными регистрирующими приборами и соответствует всем требованиям, предъявляемым к программно-аппаратным комплексам для многопараметрической регистрации в сложных природных условиях. Она обеспечивает возможность работы, как в автономном режиме, так и с передачей данных по радиотелеметрическим каналам. Ее отличает однообразие в условиях создания пунктов и расположения датчиков: все пункты располагаются в аллювиально-делювиальных отложениях речных долин; два датчика в зоне аэрации на глубинах один и два метра от дневной поверхности; большое количество регистрируемых параметров, включая метеорологические величины.

Диссертантом выполнены работы по организации новых пунктов мониторинга подпочвенных газов для расширения сети, модернизация оборудования, выполнены работы по организации связи с рядом пунктов для удаленного оперативного получения накопленных данных, разработана и апробирована методика, позволяющая оценивать величину ППР в точке установки накопительной камеры. С участием диссертанта создан формирователь импульсов ВМ-2/4, позволяющий автоматизировать мониторинг ПР на сети пунктов, создана и внедрена в работу лаборатории АРМ КФ ФИЦ ЕГС РАН система сбора данных с пунктов сети и специализированная ИС для хранения данных мониторинга подпочвенных газов.

Для пунктов радонового мониторинга Петропавловск-Камчатского геодинамического полигона характерна различная реакция на воздействие метеорологических величин. Наиболее сильное влияние на изменение ОА Rn в зоне аэрации оказывают резкие перепады атмосферного давления, связанные с циклонической активностью, а так же промерзание верхнего слоя грунта в зимний период. С учетом этого влияния, селекция предвестниковых аномалии землетрясений,

в первую очередь, осуществлялась при выделении синфазных возмущений  $OA R_n$  на нескольких пунктах регистрации.

Предложенная методика пассивной регистрации  $OA R_n$  на основе модернизированной сети пунктов Петропавловска-Камчатского геодинимического полигона с апертурой  $\sim 40$  км позволяет выделять предвестниковые аномалии на фоне различных помех надежным и метрологически простым способом.

### **ГЛАВА 3. ДИНАМИКА ПОЛЯ ПОДПОЧВЕННОГО РАДОНА И ЕЕ СВЯЗЬ С ЗЕМЛЕТРЯСЕНИЯМИ ЮЖНОЙ КАМЧАТКИ И СЕВЕРО-ЗАПАДНОЙ ОКРАИНЫ ТИХОГО ОКЕАНА**

Курило-Камчатская зона является классическим примером субдукции Тихоокеанской литосферной плиты под материк. Она протягивается вдоль восточного побережья Камчатки, Курильских островов и о-ва Хоккайдо. Здесь возникают самые крупные в Северной Евразии землетрясения с магнитудами более 8.0 и сотрясаемостью по шкале MSK-64  $I_0=10$  баллов и выше. Структура зоны четко прослеживается по расположению очагов в плане и на глубине. Протяженность ее вдоль дуги около 2500 км, по глубине - свыше 650 км, толщина - около 70 км, угол наклона к горизонту - до 50°. Сейсмический эффект на земной поверхности от глубоких очагов относительно невысок. Самые сильные ( $M = 8.0-8.5$ , сотрясения до 10–11 баллов) землетрясения возникают на глубине до 80 км в сравнительно узкой полосе между океаническим желобом, Камчаткой и Курильскими островами. Большинство из них сопровождалось мощными цунами высотой 10–15 м и выше [Уломов, 2004].

Происходящие в районе полуострова Камчатка землетрясения являются отражением временной перестройки полей сейсмотектонических напряжений, связанных с процессом взаимодействия Тихоокеанской и Евразийской тектонических плит, поэтому здесь часто происходят сильные землетрясения с  $M > 7$ .

#### **3.1. Краткосрочные предвестниковые аномалии сильных землетрясений Авачинского залива с магнитудами равными и более 5.5**

В XXI веке многие исследователи обращают внимание на реологические свойства геоматериала и усложняют модель процесса подготовки землетрясения [Соболев, Пономарев, 2003]. Так, в работе [Моргунов, 2001] показано, что в фокальной зоне очага хрупкому разрушению – землетрясению – может предшествовать квазивязкое течение горных масс в результате ползучести (крипа). Минимальное время этой стадии оценивается не менее 10 часов до толчка. Также интенсивно обсуждается вопрос о медленных волнах деформации, которые имеют определенное теоретическое обоснование и косвенно выделяются в геофизических

полях, но прямые экспериментальные доказательства существования этих волн пока очень немногочисленны, что показано в детальном обзоре [Быков, 2005].

Как показано в экспериментальной работе [Кочарян, Спивак, 2003], резкие, в том числе кратковременные, изменения напряженно-деформированного состояния контакта между блоками горной породы могут приводить к возникновению межблоковых перемещений, которые проявляются в виде «квазивязкого» течения материала земной коры. По-видимому, процесс ползучести за счет квазивязкого течения горных масс может порождать возмущения в земной коре типа уединенных деформационных волн [Быков, 2005], обусловленных взаимодействием отдельных блоков геологической среды. Эти волны в процессе распространения могут воздействовать на поле  $R_n$ , причем в зависимости от расположения пунктов регистрации относительно границ отдельных блоков, отклики в динамике ОА  $R_n$  имеют различную форму (бухтообразные, ступенчатые), а также различную полярность в зависимости от геолого-тектонических условий того или иного пункта регистрации [Фирстов и др., 2011].

Как показано в работе [Селиверстов, 2009], эпицентральные зоны землетрясений с  $M > 5.5$  района Авачинского залива приурочены к его определенным структурным элементам (рисунок 3.1):

- зона I - приурочена к подводному продолжению Шипунского разлома регионального порядка;
- зона II - отражает сеймотектонические процессы в Авачинской котловине;
- зоны III и IV - связаны с тектоникой Северного и Южного блоков подводного хребта Шатского.

Выявленный отклик в динамике подпочвенного  $R_n$  на геодинамические процессы района Авачинского залива проявляется в виде аномалий ОА  $R_n$  на пунктах регистрации, которые, в случае их возникновения до землетрясения можно назвать предвестниковыми. В 1999–2015 гг. в районе Авачинского залива в периоды, когда работала сеть радонового мониторинга из двух и более пунктов, произошло 12 землетрясений с  $M > 5.5$  на глубинах до 90 км, помеченные на рисунке 3.1 звездочками. Предвестниковые аномалии были обнаружены для 8 событий. В случае роевых и форшок-афтершоковых последовательностей рассматривалось землетрясение с максимальной магнитудой в группе. При таком подходе можно говорить о появлении предвестниковых аномалий для землетрясений с  $M = 5.5–6.9$  района Авачинского залива с вероятностью 0.67.

На основании накопленного опыта и экспериментальных данных по морфологическим признакам выделены два основных типа аномалий, возникающих перед землетрясениями

района Авачинского залива: резкие сбросы в форме ступеньки с  $t_{ан}$  менее 1 суток, бухтообразные положительной и отрицательной полярности с  $t_{ан}$  от 3 до 15 суток.

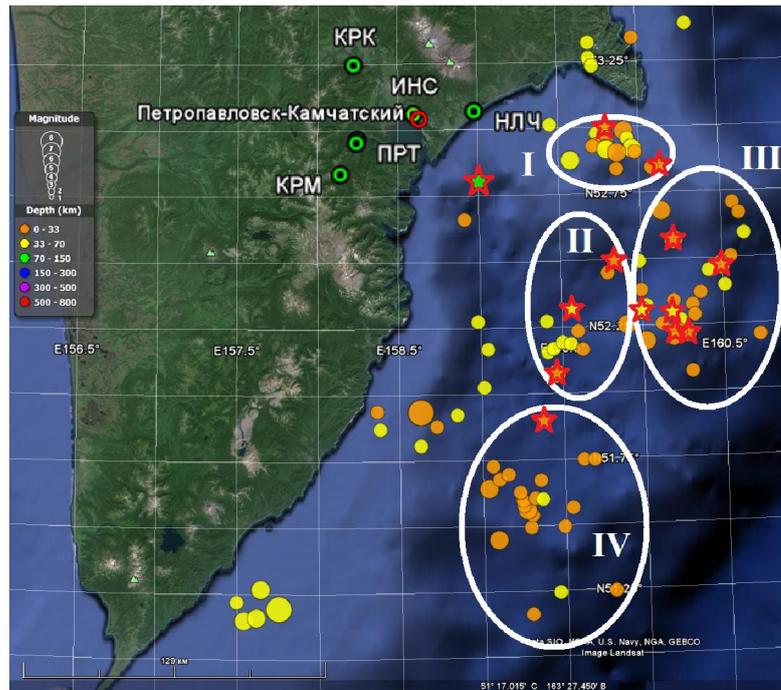


Рисунок 3.1 – Карта эпицентров землетрясений с  $M > 5.5$  по NEIC и  $H < 90$  км за период 1973–2016 гг. и схема расположения пунктов мониторинга почвенного радона по состоянию на 2014–2016 гг. Овалами выделены зоны, приуроченные к определенным структурным элементам Авачинского залива (см. текст). Звездочками отмечены землетрясения в периоды, когда работала сеть пунктов радонового мониторинга (два и более).

Названия пунктов: ИНС – скважина НИС-1 вблизи здания ИВиС ДВО РАН; ПРТ – опорный пункт, долина ручья «Коркина», пос. Паратунка; КРМ – стационар «Верхнепаратунский» ИВиС ДВО РАН, пойма р. Карымшина; КРК – район поселка Северные Коряки, пойма р. Гаванка.

Выделенные типы аномалий соответствуют данным из литературных источников. Амплитуда аномальных возмущений, предвещающих землетрясения, в поле подпочвенного  $R_n$  находится в диапазоне  $\delta=18-500\%$ , что нередко, меньше амплитуд помех, достигающих  $300\%$  и связанных со сходным по временному масштабу, воздействием метеорологических величин. Поэтому крайне важным для экспертной оценки и выделения аномалий ОА  $R_n$ , предвещающих землетрясения, на фоне регулярно возникающих изменений динамики подпочвенных газов, связанных с другими процессами, является обнаружение синфазных вариаций на нескольких пунктах регистрации, так как в зависимости от условий установки датчиков, они по-разному реагируют на метеорологическое воздействие.

Редко на сети пунктов регистрировались аномалии, не связанные с метеовоздействием, которые синхронно выделялись на 2-4 пунктах и не предвещали сильных сейсмических

событий. В 2016 г. было подано 8 прогнозных заключений в Камчатский филиал Российского экспертного совета по прогнозу землетрясений, оценке сейсмической опасности и риска. Из них 2 прогноза полностью оправдались, 4 оправдались частично (ошибки в отношении энергетических параметров землетрясений и местоположения), после 2 прогнозов сейсмических событий не произошло. При этом за указанный период произошло три землетрясения в исследуемом районе, которые не предварялись аномалиями и, соответственно, прогнозными заключениями (Приложение А).

Рассмотрим предвестниковые аномалии в динамике подпочвенного радона перед землетрясениями с  $M > 5.5$ , параметры которых приведены в таблице 3.1.

Таблица 3.1 – Основные параметры землетрясений с  $M \geq 5.5$  и их предвестников, произошедших в районе Авачинского залива в 1999–2015 гг., в периоды, когда работало несколько пунктов радонового мониторинга.

№	Дата	Время <sup>1</sup>	Координаты		M	H, км	Область	R <sub>ПРТ</sub> , км	δ% (Пункт регистрации)	v, км/сут
			φ, N	λ, E						
1	08.03.1999	12:25:45	52.08	159.46	6.9	19	II	133	25% (ППН) –10% (ПРТ)	-
2	08.10.2001	18:14:25	52.57	160.20	6.4	28	III	146	-	-
3	08.05.2002	04:12:49	52.30	160.18	5.5	44	III	150	-	-
4	15.03.2003	19:41:30	52.22	160.27	6.1	30	III	166	320% (ЛВЧ) 490% (ПРТ) –75% (НИС)	88-144
5	04.08.2004	21:15:15	52.32	159.56	5.6	36	II	130	20% (ИКР) –18% (ЛВЧ) –21% (ИНС)	30-46
6	26.07.2005	12:17:14	52.85	160.12	5.8	28	I	125	-	-
7	30.07.2010	03:56:13	52.50	159.84	6.3	23	II	120	51% (ИНС) 17% (КРМ) 20% (ПРТ)	14-25
8	26.07.2011	06:17:37	52.99	159.79	5.6	33	I	105	-	-
9	15.10.2012	01:19:03	51.90	159.38	5.6	21	IV	140	300% (ПРТ) 35% (ИНС) 25% (НЛЧ) 25% (КРМ)	100-120
10	19.05.2013	18:44:10	52.23	160.22	6.1	18	III	157	7%(ПРТ)	-
11	21.05.2013	05:43:21	52.31	159.99	6.1	37	III	139	7%(ПРТ)	-
12	19.02.2015	16:32:47	52.81	159.00	5.5	82	-	54	20% (ПРТ)	-

Примечание – φ, N – градусы северной широты, λ, E – градусы восточной долготы, M – магнитуда по NEIC (National Earthquake Information Center), H – глубина, R<sub>ПРТ</sub> – расстояние до опорного пункта ПРТ, δ% – относительная амплитуда аномалий, v – диапазон кажущихся скоростей распространения фронта возмущения.

<sup>1</sup> Здесь и далее используется время UTC.

Форшок-афтершоковая последовательность землетрясений 8 марта 1999 г.,  $M_{max} = 6.9$ ,  $R = 133$  км, район Авачинской котловины. В этот период работали два пункта регистрации подпочвенного радона ПРТ и ППН. В пункте ППН регистрация радона велась на двух глубинах в зоне аэрации. Измерения велись радиометрами РГА-01 два раза в сутки. На обоих пунктах выделяются аномалии с  $\delta_{ППН} \approx 25\%$  и  $\delta_{ПРТ} \approx -10\%$  (рисунок 3.2). В трехмерном агрегированном сигнале, рассчитанном по методике [Любушин, 2007], за 14 суток перед главным толчком выделяется бухтообразная аномалия длительностью 12 суток.

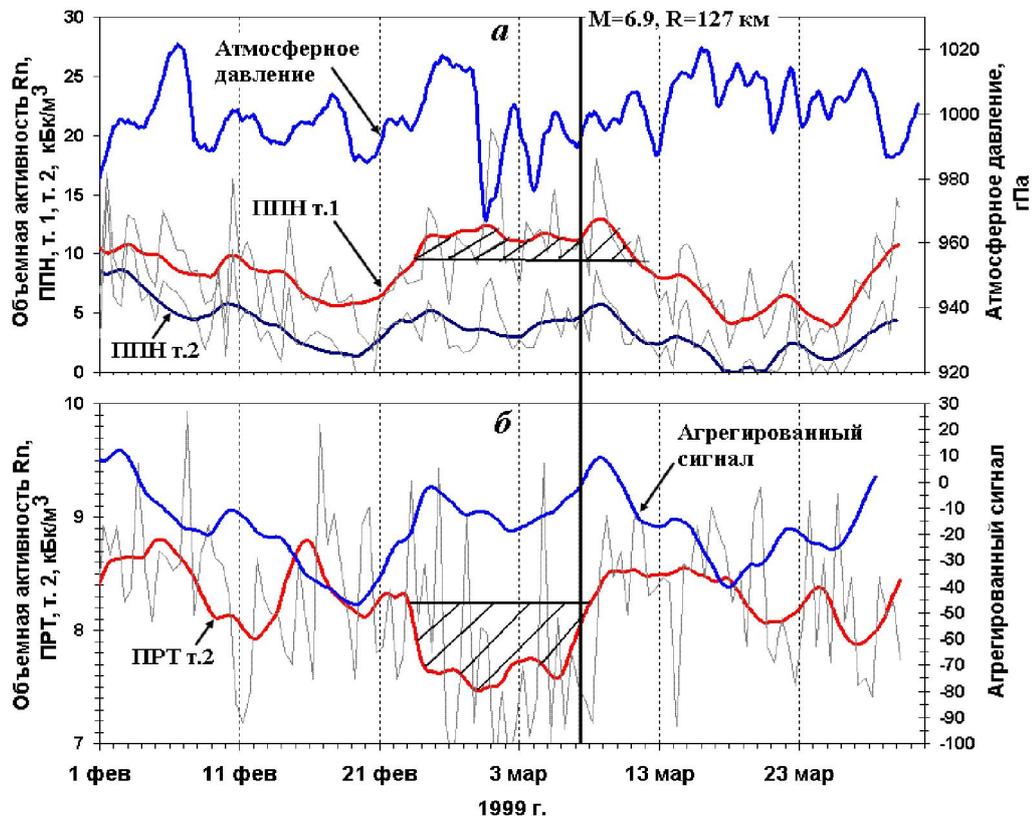


Рисунок 3.2 – Динамика подпочвенного Rn в пункте ППН и вариации атмосферного давления (а), динамика подпочвенного Rn в пункте ПРТ и агрегированный сигнал (б). Тонкие линии – исходные данные, толстые линии – осредненные скользящим средним по пяти точкам.

В районе Северного блока подводного хребта Шатского с 15 по 19 марта 2003 г. в Авачинском заливе на глубинах более 30 км и на расстоянии от пункта ПРТ 166 км произошла афтершоковая последовательность землетрясений с  $M_{max} = 6.1$  (рисунок 3.3а).

На трех пунктах, образующих треугольник с апертурой  $\sim 40$  км, в динамике ОА Rn после выполнения барокомпенсации [Любушин, 2007] и фильтрации колебаний, обусловленных суточным ходом температуры, выделяются бухтообразные аномалии в виде резкого увеличения ОА Rn в пунктах ЛВЧ и ПРТ с относительными амплитудами  $\delta_{ЛВЧ} = 320\%$ ,  $\delta_{ПРТ} = 490\%$ , и уменьшения с  $\delta_{ИНС} = -75\%$  в пункте ИНС. С учетом накопленного эмпирического опыта и по максимуму коэффициента кросс-корреляции между временными рядами пунктов оценивались

диапазоны относительных сдвигов моментов вступления выделенных бухтообразных аномалий длительностью  $\sim 5$  суток (рисунок 3.3б). При допущении плоского фронта возмущения, распространяющегося с постоянной скоростью и вызвавшего аномалии в поле подпочвенного  $R_n$ , по диапазону разности моментов прихода выделенных вступлений оценивался сектор, центральная линия которого принималась азимутом на источник этого возмущения. Он составил  $\alpha = 149^\circ$ , что удовлетворительно совпадает с направлением на эпицентр землетрясения (рисунок 3.3а). При этом диапазон кажущейся скорости распространения возмущения составил  $v_{КАЖ} = 88-144$  км/сутки.

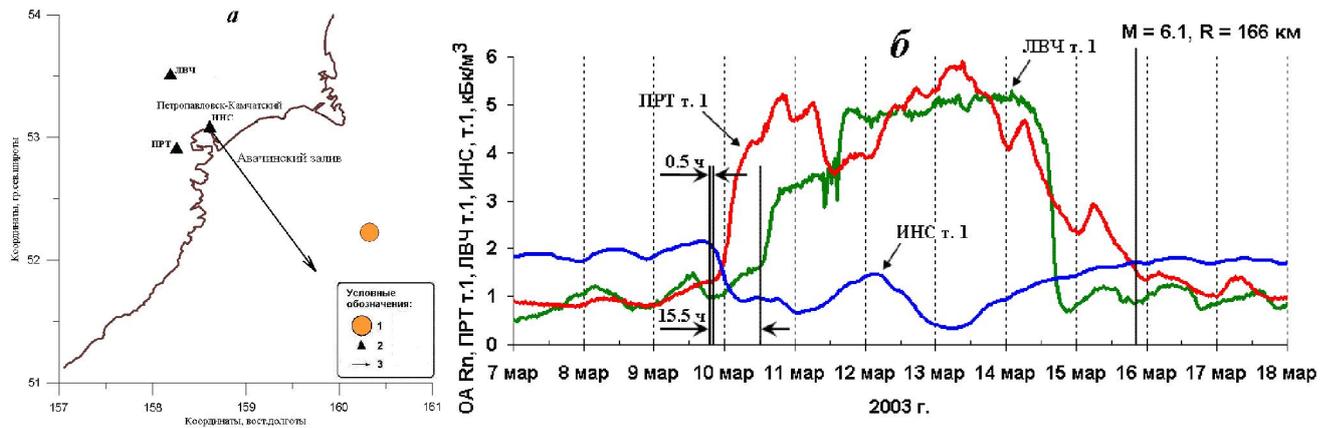


Рисунок 3.3 – Схема расположения сети пунктов радонового мониторинга в 2003 г. и положение основного толчка афтершоковой последовательности 15-19 марта (а), динамика объемной активности радона в пунктах ИНС т.1, ПРТ т. 1, ЛВЧ т. 1, за период 7-18 марта (б). Начала аномалий отмечены вертикальными линиями, возле которых указаны времена запаздывания вступлений аномалий относительно пункта ИНС.

1 - эпицентр основного толчка; 2 - пункты наблюдений; 3 - азимут на источник возмущения.

В районе Авачинской котловины 4-5 августа 2004 г. произошел рой землетрясений с двумя наиболее сильными событиями с  $M = 5.6$  (рисунок 3.4а), ощущавшимися с интенсивностью 2-3 балла в г. Петропавловске-Камчатском.

В динамике ОА  $R_n$  в период 3-5 августа достаточно четко выделяются моменты переломов на трех пунктах ИКР, ИНС, ЛВЧ (рисунок 3.4), которые можно рассматривать как ступенчатые аномалии с  $\delta = 18-20\%$ . Для аномалии в виде резкого сброса с  $\delta = -18\%$  в ближайшем от эпицентра пункте регистрации ИНС  $t_{УПР} = 12$  часов. Близкая по динамическим характеристикам аномалия зарегистрирована и в пункте ЛВЧ. Она появилась уже спустя  $\sim 12$  часов после события и не может считаться предвестниковой.

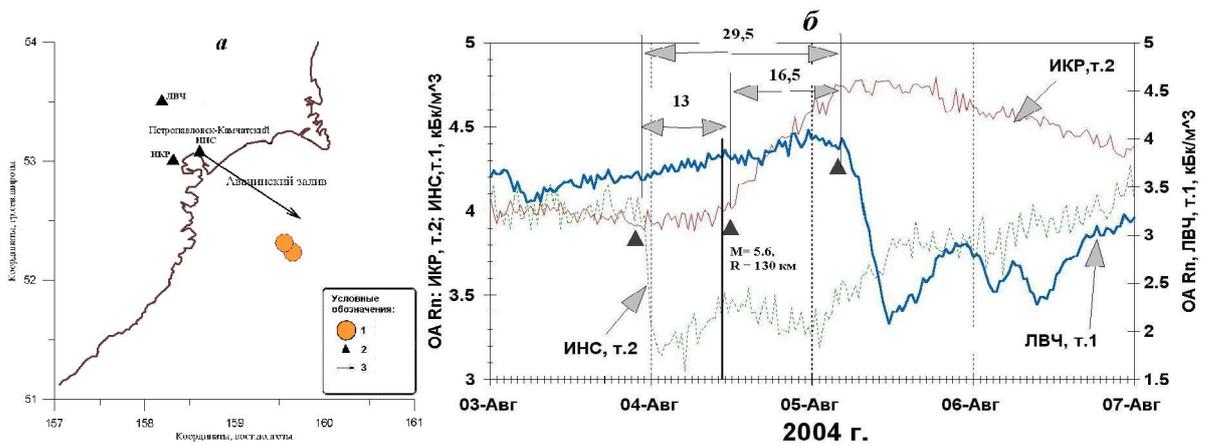


Рисунок 3.4 – Схема расположения сети пунктов радонового мониторинга в 2004 г. и эпицентров наиболее сильных землетрясений роевой последовательности (а), исходные данные регистрации ОА Rn на трех пунктах за 3-6 августа (б).

1 - эпицентры землетрясений с  $M = 5.6$ ; 2 – пункты наблюдений, работавшие в 2004 г.; 3 – азимут на источник возмущения. Треугольниками отмечены моменты вступления аномалий.

Оба пункта расположены в зоне Петропавловского горста. На станции ИКР, расположенной в Паратунском грабене, предвестниковая аномалия выразилась в плавном увеличении ОА Rn с  $\delta \approx 20\%$  уже после события [Фирстов и др., 2011].

Как и для предшествующего случая, по максимуму коэффициента кросс-корреляции между временными рядами, определялась разность вступлений предвестниковых аномалий на треугольник станций [Фирстов и др., 2011]. Также рассчитывался азимут на источник возмущения, который с точностью до  $15^\circ$  совпал с направлением на эпицентры наиболее сильных землетрясений роя (рисунок 3.4а). Диапазон кажущейся скорости его распространения составил  $v_{КАЖ} = 30-46$  км/сутки.

С 30 июля по 3 августа 2010 г. в Авачинской котловине на глубинах 20-60 км произошла форшок-афтершоковая последовательность землетрясений с  $M_{max} = 6.3$  и  $R_{ПРТ} = 120$  км. Спустя две недели севернее мыса Шипунского произошел рой землетрясений на глубинах 40-60 км с  $M_{max} = 5.8$  (рисунок 3.5а).

На рисунке 3.5б показана динамика ОА Rn в трех пунктах (КРМ, ИНС, ПРТ), диапазон разности вступлений предвестниковых аномалий ( $\delta_{ИНС} = 51\%$ ,  $\delta_{КРМ} = 17\%$ ,  $\delta_{ПРТ} = 20\%$ ) определялся по методике, описанной выше. Рассчитанный азимут прихода возмущения составил  $\alpha = 162^\circ$  и расходится с направлением на эпицентр землетрясения на  $\sim 45^\circ$ , а  $v_{КАЖ} = 14-25$  км/сутки. Значительное расхождение азимутов может быть связано с неудачным расположением пунктов практически на прямой линии относительно направления на эпицентр.

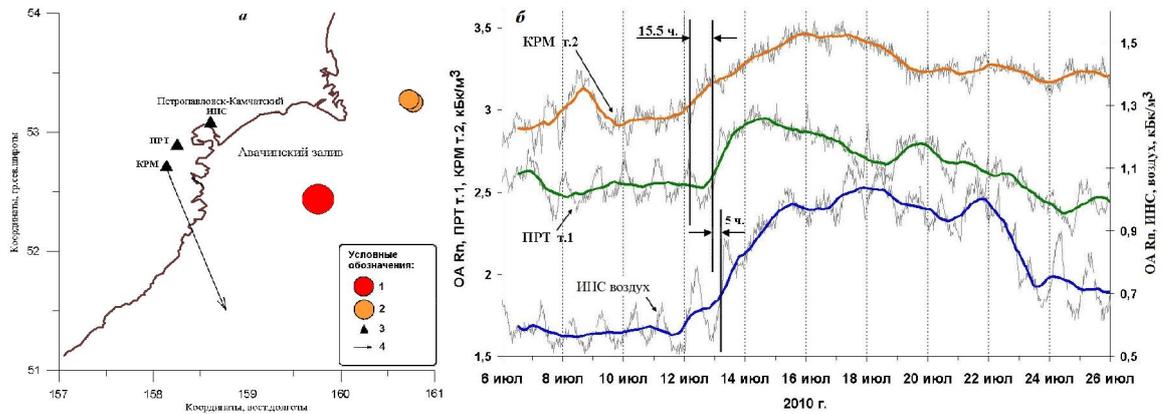


Рисунок 3.5 – Схема расположения сети пунктов радонового мониторинга в 2010 г. и карта эпицентров наиболее сильных землетрясений за период 25 июля–25 августа (а), динамика ОА Rn в пунктах ИНС, КРМ, ПРТ, за период 6–26 июля. (б). Начала аномалий отмечены линиями, возле которых указаны времена запаздывания относительно пункта КРМ. 1 – эпицентр землетрясения 30 июля 2010 г.; 2 – эпицентры наиболее сильных землетрясений роевой последовательности; 3 – пункты наблюдений; 4 – азимут на источник возмущения. Тонкие линии – исходные данные, жирные линии осредненные скользящим средним в суточном окне.

Для землетрясения 15.10.2012 г. с  $M = 5.6$  и глубиной очага  $H = 21$  км в Авачинском заливе в районе Южного блока подводного хребта Шатского, одновременно с аномалиями в динамике ОА Rn зарегистрировано бухтообразное возмущение на наклономерной станции «Петропавловск» (РЕТТ) [Фирстов и др., 2013; Макаров, Сероветников, 2014]. Подобная картина наблюдалась перед землетрясением Идзу-Осима (Япония) 14.01.1978 г.,  $M = 7.0$  [Wakita, 1981] (см. рисунок 1.4а,б).

Особенностью сейсмичности перед этим событием является рой слабых землетрясений с  $K_S < 10.5$  в Авачинском заливе на глубинах 90-100 км, произошедший 5-21 сентября 2012 г. (рисунок 3.6).

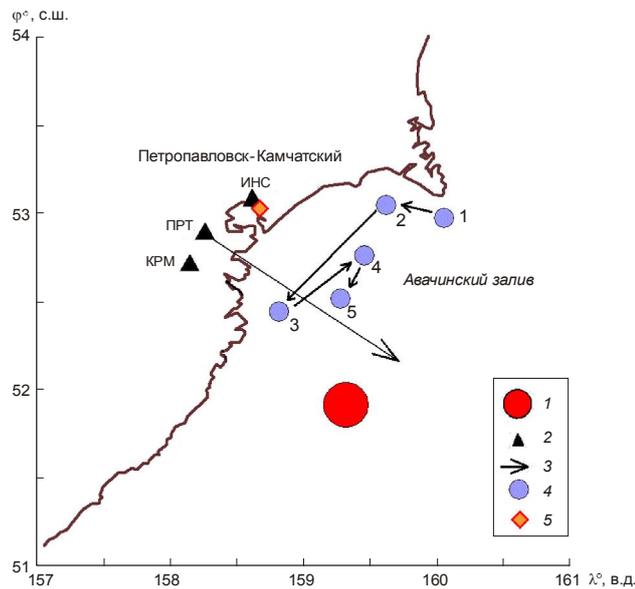


Рисунок 3.6 – Схема расположения сети пунктов радонового мониторинга, наклономерной станции и карта эпицентров землетрясений, произошедших в Авачинском заливе в сентябре–октябре 2012 г.:

1 – эпицентр землетрясения 15.10.2012 г.; 2 – пункты радонового мониторинга; 3 – азимут на источник возмущения; 4 – эпицентры землетрясений с  $8.5 \leq K \leq 10.2$ ,  $90 \leq H \leq 102$  км (5–21 сентября 2012 г.); 5 – наклономерная станция РЕТТ. Название пунктов см. рисунок 2.1.

На рисунке 3.7а-в тонкими линиями показана динамика ОА Rn за период 1–17 октября 2012 г. в трех пунктах после барокомпенсации, а жирными линиями отображены кривые после фильтрации, аномалии заштрихованы. В динамике ОА Rn с 7 по 11 октября выделяются положительные бухтообразные аномалии с  $\delta_{\text{ПРТ}} = 300\%$ ,  $\delta_{\text{ИНС}} = 35\%$ ,  $\delta_{\text{НЛЧ}} = 25\%$ ,  $\delta_{\text{КРМ}} = 25\%$ ,  $t_{\text{УПР}} = 9$  суток. Рассчитанный азимут на источник возмущения  $\alpha = 135^\circ$  удовлетворительно совпадает с направлением на эпицентр землетрясения 15.10.2012 г. (рисунок 3.7), при этом  $v_{\text{КАЖ}} = 100\text{--}120$  км/сутки.

Кривые двух составляющих (N-S, E-W) наклономерной станции РЕТТ с учетом влияния вариаций атмосферного давления и температуры, а также с отфильтрованной приливной компонентой за тот же период показаны на рисунке 3.7г, где хорошо просматривается бухтообразное возмущение с периодом  $T \sim 4$  суток, обусловленное деформационным процессом. Он характеризуется плавным вертикальным смещением грунта на составляющей N-S, начавшимся 07.10.2012 г. и последующим возвратом до исходных значений 11.10.2012 г. Максимальная относительная деформация оценивается  $2 \cdot 10^{-6}$  [Макаров, Сероветников, 2014]. Экспериментальные данные дают возможность предположить, что деформации, зарегистрированные наклономером, нашли отклик в динамике подпочвенного Rn и оба метода

зарегистрировали возмущение типа уединенной деформационной волны длительностью около 4 суток, возникшее на последней стадии подготовки землетрясения 15.10.2012 г.

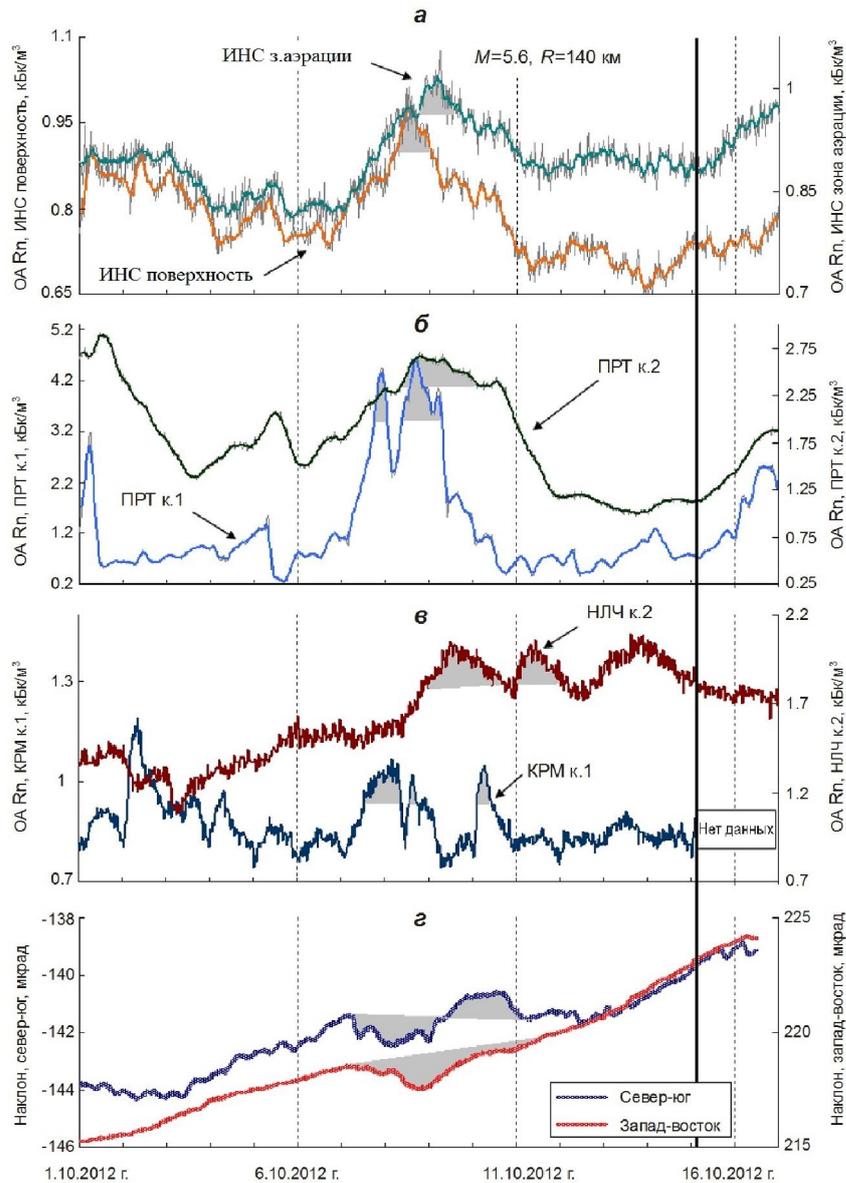


Рисунок 3.7 – Динамика ОА Rn в пунктах сети: а – ИНС (зона аэрации, поверхность); б – ПРТ, к.1, к.2; в – НЛЧ, КРМ; г – отфильтрованные от суточного приливного компонента кривые наклонов двух составляющих на станции РЕТТ с учетом барокомпенсации.

В связи с предшествующей землетрясению 15 октября 2012 г. сейсмичностью Авачинского залива появляется возможность выделения местоположения области, породившей такую волну. С этой целью рассмотрим поперечный разрез фокальной зоны для района северной части Авачинского залива из работы [Федотов и др., 1987]. На разрезе показаны очаги землетрясений с  $K_S > 8.5$  за период 1962-1985 гг., а также очаги сильнейшего землетрясения Камчатки с  $M = 8.5$  в 1952 г. и землетрясения с  $M = 7.2$  в 1971 г., вызвавшие наибольшие сотрясения в г. Петропавловске-Камчатском интенсивностью 6-8 баллов (рисунок 3.8).

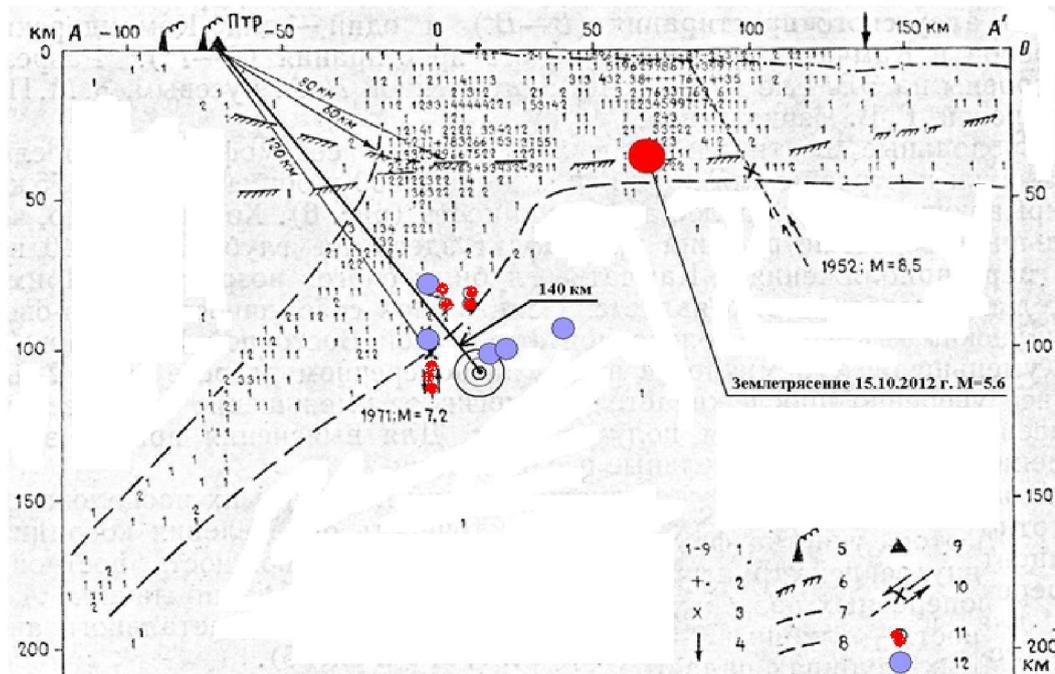


Рисунок 3.8 – Поперечный разрез фокальной зоны для района северной части Авачинского залива [Федотов и др. 1987].

Землетрясения  $K_S \geq 8.5$  за 1962–1981 гг. 1 – 3 число землетрясений в прямоугольнике 6.25x10.5 км: от 1 до 9; от 10 до 20; от 21 до 30 соответственно. 4 – ось глубоководного желоба; 5 – вулканы; 6 – граница Мохоровичича; 7 – рельеф морского дна; 8 – контур фокальной зоны; 9 – сейсмические станции; 10 – области очагов сильнейшего землетрясения 1952 г. и землетрясения 1971 г.; 11 – афтершоки землетрясения 1971 г.; 12 – гипоцентры землетрясений с  $K_S = 8.5 - 10.2$  (05–21 сентября 2012 г.).

Очаги слабых землетрясений, зарегистрированных перед событием 15 октября 2012 г., образуют компактную область на внутренней границе зоны Заварицкого-Беньфа. По-видимому, слабая сейсмичность служит индикатором квазипластичного течения геоматериала, произошедшего в этот период. Пространственно, эта зона и очаг землетрясения 15 октября 2012 г. разнесены на ~90 км.

Процесс квазипластичного течения на глубинах около 100 км мог стать причиной возникновения выделенного сигнала типа уединенной деформационной волны и был индикатором изменения напряженно-деформированного состояния геосреды, результатом которого стало землетрясение 15 октября 2012 г.

### 3.2. Предвестниковые аномалии перед Жупановским землетрясением с магнитудой 7.2 и глубиной очага 177 км

Жупановское землетрясение (ЖЗ) с  $M_W = 7.2$  произошло под восточным побережьем Камчатки 30.01.2016 г. в 03:25. Его эпицентр находился ~100 км к северу от г. Петропавловска-Камчатского (рисунок 3.9), где оно ощущалось с интенсивностью 4-5 баллов по шкале MKS-64 [Чебров и др., 2016]. Это землетрясение рассматривается отдельно в связи с его особенностью, большой глубиной очага, которая оценивается более чем 160 км. Несмотря на это, предвестниковые аномалии перед ЖЗ зафиксированы по данным шести методов, позволяющих вести мониторинг некоторых параметров геофизических полей [Чебров и др., 2016].

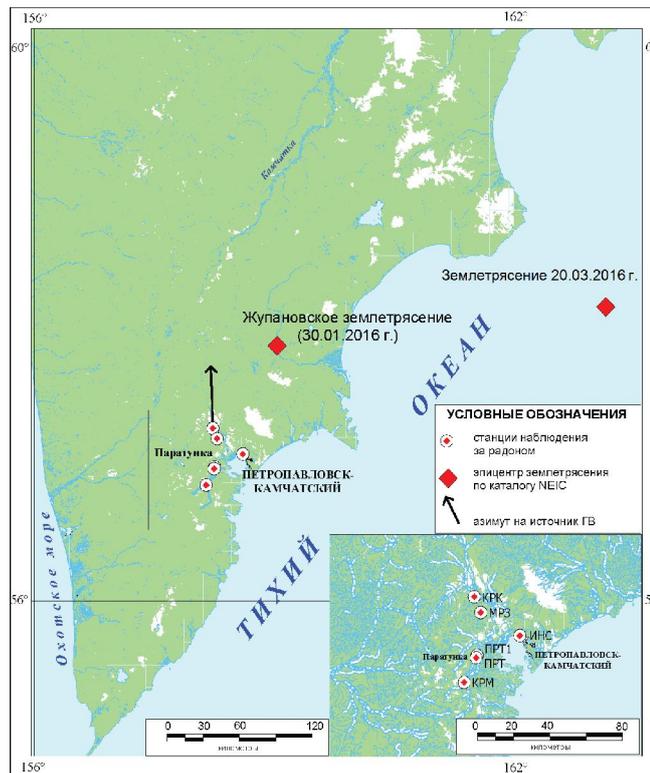


Рисунок 3.9 – Сеть пунктов регистрации подпочвенных газов на Петропавловск Камчатском геодинамическом полигоне в 2016 г. и эпицентры Жупановского землетрясения и землетрясения 20.03.2016 г.:

ИНС – пункт на базе скважины НИС-1 вблизи здания ИВиС ДВО РАН, ПРТ – пункт в долине ручья Коркино (Паратунский грабен), ПРТ1-геотермальный стационар ИВиС ДВО РАН, КРК – пункт в поселке Коряки, МРЗ – район горы «Морозная».

Следует отметить, что 20.03.2016 г. в акватории северной части Кроноцкого залива произошло более слабое землетрясение с  $M = 6.4$  (рисунок 3.9). Параметры обоих землетрясений по данным NEIC приведены в таблице 3.2.

Таблица 3.2 – Параметры Жупановского землетрясения 30.01.2016 г. и землетрясения с  $M = 6.4$ , 20.03.2016 г.

№	Дата	Время	Координаты		$M$ (NEIC)	$H$ , км	$R_{ПРТ}$ , км	$\delta\%$ максима -льная	Примечание
			$\varphi$ , N	$\lambda$ , E					
1	30.01.2016	03:25:12	53.98	158.55	7.2	177	100	-80	Жупановское землетрясение
2	20.03.2016	22:50:20	54.29	162.81	6.4	30	300	100	Землетрясение Кроноцкого залива

Примечание –  $\varphi$ , N – градусы северной широты,  $\lambda$ , E – градусы восточной долготы,  $M$  – магнитуда,  $H$  – глубина,  $R_{ПРТ}$  – расстояние до опорного пункта ПРТ,  $\delta\%$  – относительная амплитуда аномалии.

Рассмотрим особенности динамики подпочвенных газов и других параметров до ЖЗ в пункте ИНС за период 1 января–10 апреля 2016 г. Прежде всего, в реальном времени было обращено внимание на падение температуры, зарегистрированной в стволе скважины на глубине 15 м прецизионным датчиком (см. раздел 2.2). С 1 декабря до 6 января 2016 г. наблюдалось медленное падение температуры на  $0.02^\circ\text{C}$  с последующим резким падением 7–8 февраля на  $0.04^\circ\text{C}$ . В предшествующие два года, температура в стволе скважины в зависимости от сезона года плавно менялась в диапазоне  $7.56 \pm 0.02^\circ\text{C}$ , а резких уменьшений температуры не регистрировалось (рисунок 3.10).

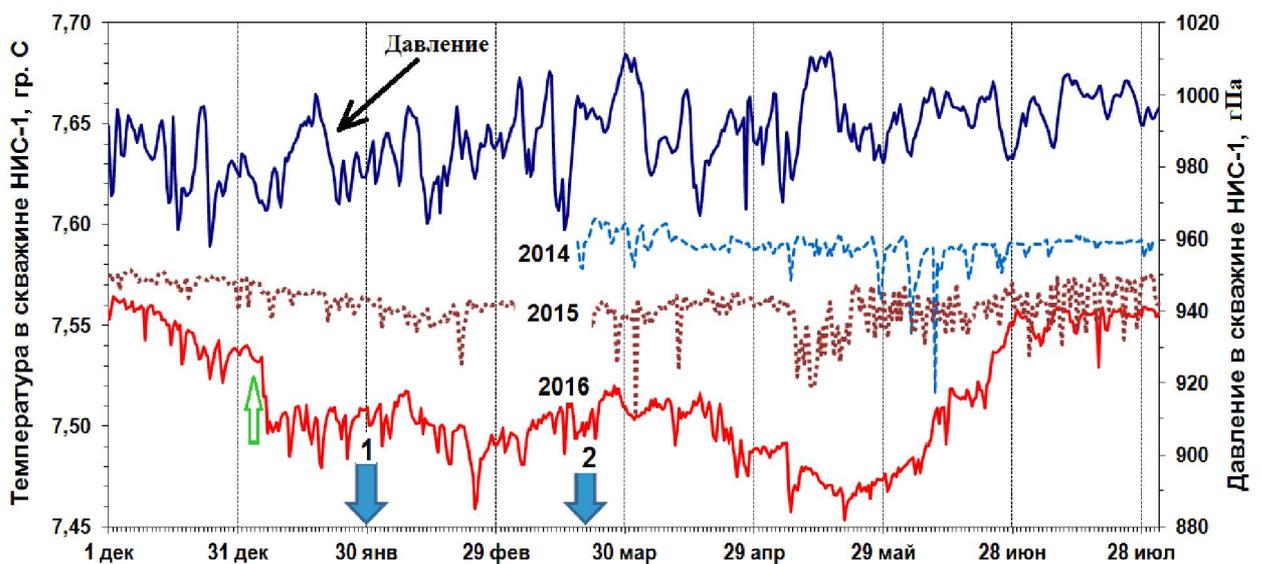


Рисунок 3.10 – Вариации температуры, зарегистрированные прецизионным датчиком в обсадной трубе скважины пункта ИНС на глубине 15.5 м в период 1 декабря–31 июля с 2014 г. по 2016 г.; вариации давления в обсадной трубе скважины пункта ИНС на глубине 15.5 м в период 1 декабря–31 июля 2016 г. Стрелками отмечены ЖЗ и землетрясение в Кроноцком заливе 20.03.2016 г.

Предвестниковая аномалия на двух датчиках  $H_2$  (TGS82 и ВСГ-02), которые располагались в стволе скважины на глубинах 5 и 9 м от оголовка, началась 20 января 2016 г. Аномалия представляла собой квазипрямоугольный импульс длительностью около 6 суток и относительной амплитудой  $\delta \approx 73.5\%$  и хорошо визуально диагностировалась в реальном времени при стандартной методике обработки получаемых данных (рисунок 3.11*a*). Вступление аномалии на датчиках  $H_2$  было зарегистрировано в 4:30 20.01.2016 г. Аномалии развивались ~14 часов с последующим выходом на плато, длительность которого составила 4.5 суток. Несколько ранее в 2:30 в стволе скважины началось уменьшение  $CO_2$  (рисунок 3.12*a*). Эти аномалии послужили основой для выдачи прогноза (см. приложение Б).

В этот период температура в бункере не подвергалась резким колебаниям и составляла ~2.5°C, несмотря на ее суточные колебания в наземном контейнере с размахом до 10°C (рисунок 3.11*a*).

Изменение температуры и концентрации газов в стволе скважине говорит о сложных процессах, происходящих как в затрубном пространстве скважины, так и в водоносном горизонте, который вскрывает скважина. По-видимому, в затрубное пространство могла поступить вода с пониженной температурой, что привело к охлаждению металлической колонны, косвенно зафиксированному прецизионным датчиком. На последней стадии подготовки ЖЗ произошло понижение уровня воды в скважине, что привело к падению давления в столбе воздуха под «пробкой» и уменьшению  $CO_2$  в воздухе над ней. В пользу такого предположения говорит понижение уровня воды в скважине ЮЗ-1, находящейся в пределах Петропавловск-Камчатского геодинамического полигона, которое объясняется дилатансионным процессом, предваряющим ЖЗ [Копылова и др., 2016].

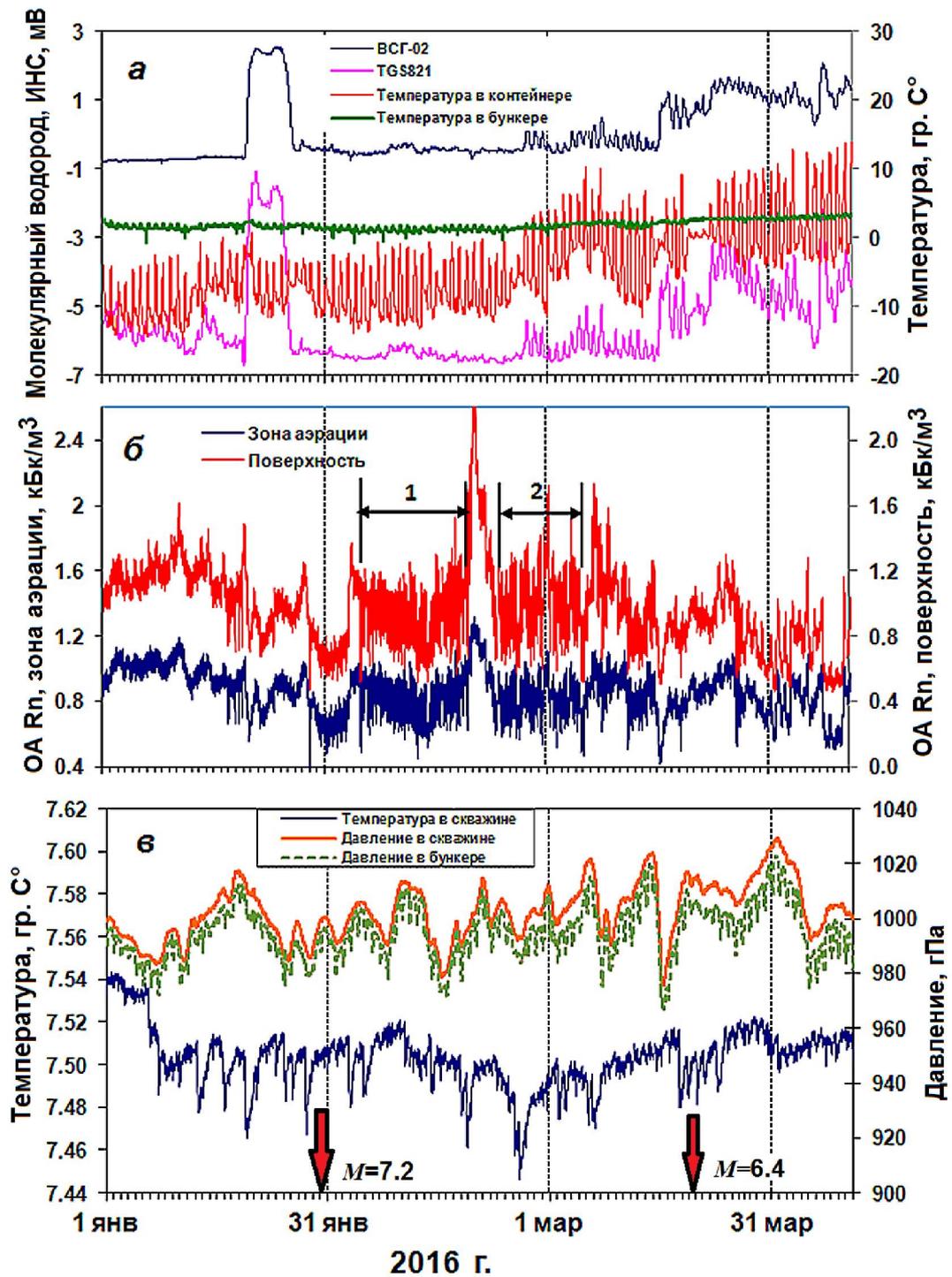


Рисунок 3.11 – Динамика регистрируемых в пункте ИИС параметров за период 01.01-10.04.2016 г.,

*a* – два датчика водорода в скважине, температура воздуха в контейнере и бункере; *б* – ПР в зоне аэрации на глубинах 0.1 и один метр; *в* – давление и температура в скважине на глубине 15.5 м, атмосферное давление в бункере. Цифрами отмечены два участка, где наблюдались квазипериодические колебания значений ОА Rп.

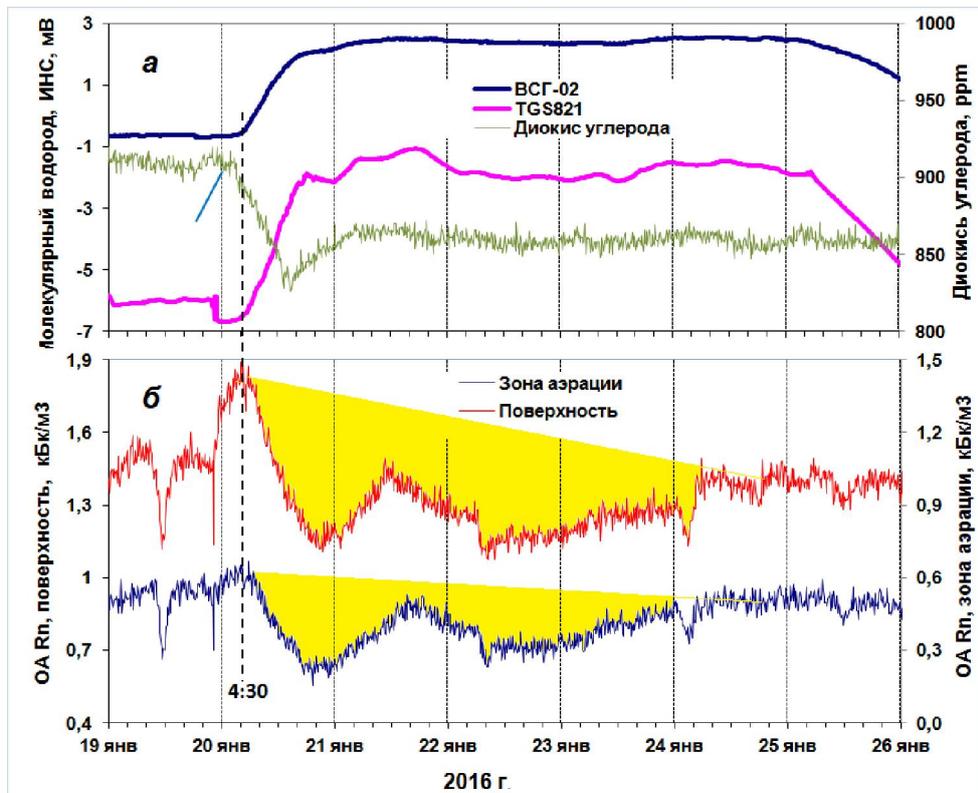


Рисунок 3.12 – Развитие аномалий перед ЖЗ в молекулярном водороде на двух уровнях и диоксиде углерода в стволе скважине (а), в подпочвенном Rn в зоне аэрации на двух глубинах (б).

На графиках ОА Rn в зоне аэрации в этот период видна слабо выраженная отрицательная аномалия с  $\delta \approx 37\%$ , которая на общем фоне достаточно зашумленного сигнала выделяется нечетко (рисунок 3.12б). Следует отметить, что за счет конструктивных особенностей в заборной емкости, установленной на поверхности, отсутствует воздухообмен с воздушной средой и поэтому значение ОА Rn на глубине 0.1 м выше относительно зоны аэрации на глубине один метр.

Рассмотрим динамику ОА Rn в зоне аэрации в пунктах (КРК, ПРТ1 и ИНС) в период с 01.01.2016 г. по 10.02.2016 г. [Фирстов, Макаров, Глухова, 2017а]. На всех трех кривых синфазно выделяется бухтообразное отрицательное возмущение (рисунок 3.13), которое синфазно проявилось в концентрациях  $\text{H}_2$  и  $\text{CO}_2$  в пункте ИНС (рисунок 3.12а). Относительная амплитуда аномалий составила:  $\delta_{\text{КРК}} = -17\%$ ,  $\delta_{\text{ПРТ1}} = -80\%$ ,  $\delta_{\text{ИНС}} = -37\%$ , а время упреждения  $t_{\text{упр}} = 10$  суток.

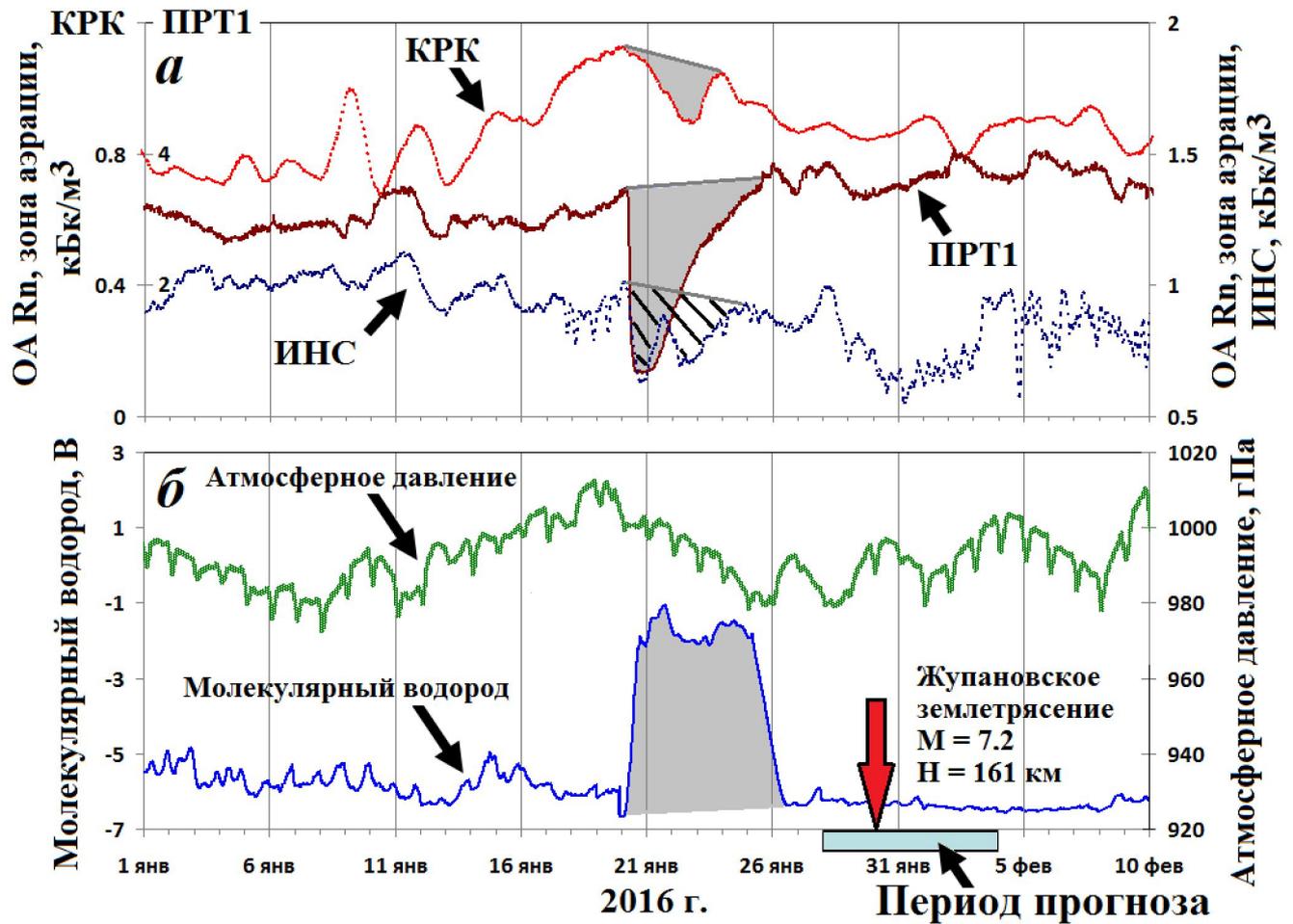


Рисунок 3.13 – Осредненные скользящим средним в 2.5-часовом окне кривые ОА Rn в зоне аэрации в различных пунктах.

1 – КРК, 2 – ПРТ1, 3 – ИНС (а), 4 – атмосферное давление, 5 – концентрация водорода в пункте ИНС (б) за период 01.01–15.02.2016 г. Предвестниковые аномалии выделены серым фоном [Фирстов, Макаров, Глухова, 2017а].

На динамику подпочвенного Rn в зоне аэрации существенное влияние оказывают вариации атмосферного давления. Как видно на рисунке 3.13б, связи аномалии с атмосферным давлением визуально не просматривается. В работе [Cicerone et al., 2009] собрана сводка предвестниковых аномалий перед землетрясениями, в том числе и радоновых. Из 67 случаев, только 5 имеют отрицательное значение, что характеризует этот случай как уникальный.

Для расчета азимута прихода возмущения были использованы данные ОА Rn в трех пунктах, образующих треугольник с апертурой  $\sim 40$  км (КРК, ИНС, ПРТ1). Для выделения диапазона вступлений аномалий и определения времени их запаздывания относительно первого пункта - КРК, была произведена фильтрация рядов данных для устранения суточных колебаний, обусловленных термическим приливом. Азимут составил  $\alpha = 358^\circ$ , что отличается от азимута на эпицентр по данным NEIC на  $14^\circ$  (рисунок 3.9). Диапазон кажущейся скорости распространения возмущения составил  $v_{\text{КАЖ}} = 250\text{--}270$  км/сутки, что значительно выше

относительно рассмотренных ранее случаев. Это косвенно указывает на более глубокий источник возмущения, предшествующего ЖЗ. Работы по фильтрации и кросскорреляции рядов выполнялись в программном комплексе WinABD [Дещеревский и др., 2016].

После ЖЗ в динамике ОА Rn в пункте ИНС на обоих каналах выделяются два временных участка появления квазисинусоидальных колебаний с 5 по 19 февраля и с 23 февраля по 15 марта (рисунок 3.11; рисунок 3.14а,б). За предшествующий период наблюдений, начиная с 2003 г. ничего подобного в пункте ИНС не наблюдалось.

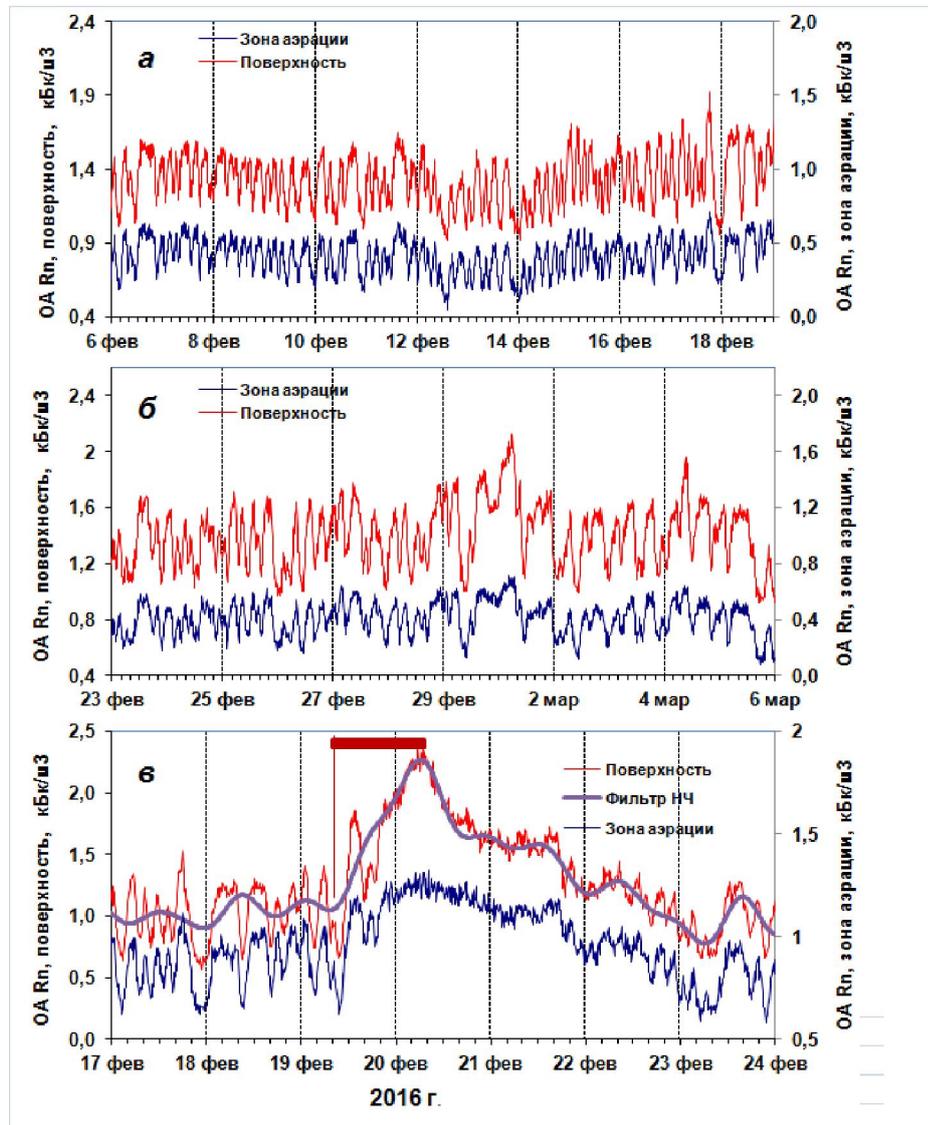


Рисунок 3.14 – Участки квазисинусоидальных колебаний в динамике ПР после ЖЗ (а, б) и аномальное возмущение между ними (в).

Участки квазисинусоидальных колебаний разделены возмущением, которое не было зарегистрировано в других пунктах сети мониторинга ПР. Относительная амплитуда его составила на «поверхности»  $\delta = 100\%$ , а в зоне аэрации более  $50\%$  (рисунок 3.14в). Предполагается, что данное возмущение могло быть связано с подготовкой землетрясения,

произошедшего 20.03.2016 г., с  $M = 6.4$  (см. рисунок 3.9), а его механизм рассмотрен в разделе 4.2.

Причины появления колебаний ОА Rn остаются неясными, но можно сделать предположение о возможном механизме их возникновения на основании представлений о строении данного пункта наблюдений. Предполагается наличие двух колебательных систем, возбуждающих колебания ОА Rn: первая колебательная система связана с собственными колебаниями гидросистемы вблизи обсадной колонны, а вторая возбуждается за счет приливного воздействия на нее. Такая сложная конфигурация колебательного процесса могла возникнуть в результате постсейсмического эффекта после ЖЗ. По данным Камчатской региональной сети GNSS (Global Navigation Satellite System) зафиксированы статические косейсмические смещения в диапазоне  $-(4-12)$  мм, вызванные ЖЗ [Чебров и др., 2016].

Вертикальная деформация большого по площади района могла вызвать изменение в гидрологических системах, которое определяется геолого-тектоническим строением в районах пунктов регистрации ПР и конкретным их устройством. В пункте ИНС, где регистрация ОА Rn осуществляется в непосредственной близости от ствола скважины, вертикальные деформации могли изменить гидрологический режим околотрубного пространства обсадной колонны и привести к автоколебаниям, оказывающим модулирующее воздействие на поток Rn при его миграции к дневной поверхности.

Спустя 98 часов после ЖЗ в пункте ИНС наблюдалось резкое увеличение ОА Rn ( $\delta_{\text{АЭ}} \approx 37\%$ ,  $\delta_{\text{ПОВ}} \approx 100\%$ ) длительностью около двух суток, после которого возникли квазисинусоидальные колебания (рисунок 3.15). На взгляд диссертанта, это возмущение является постсейсмическим эффектом ЖЗ в поле подпочвенного радона пункта ИНС, причиной которого могли быть значительные сотрясения грунта и вертикальные деформации. Следует отметить, что удельная активность  $^{226}\text{Ra}$ , измеренная с помощью сцинтилляционного гамма-спектрометра, в первом слое достаточно мала ( $A_{226\text{Ra}} \approx 10$  Бк/кг), поэтому в данном случае почвенно-пирокластический чехол можно рассматривать только как зону транзита без значительного выделения Rn.

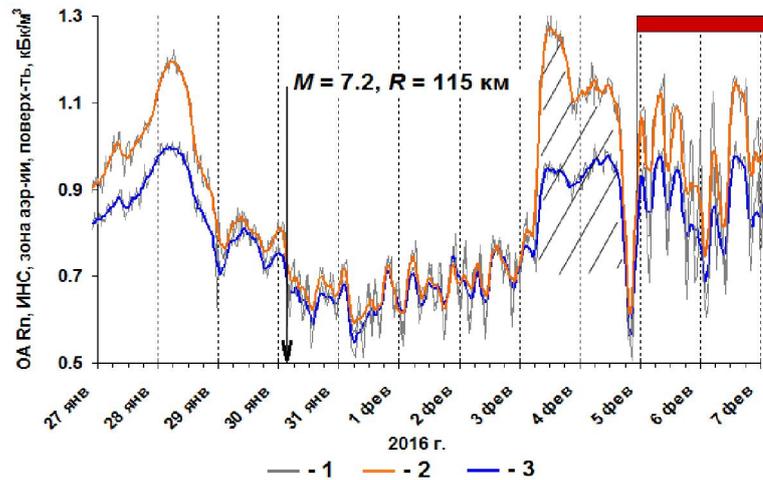


Рисунок 3.15 – Кривые ОА Rn в пункте ИНС. Постсейсмическая аномалия Rn выделена штриховкой, момент начала квазипериодических колебаний показан красным прямоугольником.

1 – исходные данные, 2 – ОА Rn на поверхности в пункте ИНС, осредненная скользящим средним в трехчасовом интервале, 3 – ОА Rn в зоне аэрации пункта ИНС, осредненная скользящим средним в трехчасовом интервале.

Миграция Rn в первых двух слоях осуществляется за счет адвекции и диффузии. Согласно представлениям о миграции Rn в грунте с полным влагонасыщением, поток газов в форме микропузырьков является основным механизмом транспортирования Rn к дневной поверхности [Varhegyi et al., 1986; Бондаренко, Иванова, 1999; Etiope, Martinelli, 2002]. При этом механизм миграции эндогенных газов определяется взаимодействием воды в порах и трещинах с породой.

Учитывая, что УГВ, выделенный по данным сейсморазведки в пункте ИНС, расположен на глубине 7-8 м и представляет собой эманурующий горизонт, можно предположить следующий механизм генерации этого возмущения. Сейсмическое воздействие ЖЗ на нижележащие обводненные породы вызвало изменение их пористости, трещиноватости, проницаемости и, как следствие, выход из ранее закрытых пор Rn в систему магистральных трещин и увеличение его потока к границе УГВ и с поверхности эманующего горизонта. Спустя 98 часов повышенное содержание Rn, в результате транзита за счет диффузии и конвекции через почвенно-пирокластический чехол и переотложенные обвальновзрывные отложения достигло датчиков в накопительных емкостях пункта ИНС.

Момент четкого вступления бухтообразной постсейсмической аномалии ПР и глубина залегания УГВ в пункте ИНС дали возможность оценить скорость миграции Rn к поверхности через первые два слоя ( $v=2.1 \cdot 10^{-3}$  см/с), которая оказалась близкой к скорости в пункте ПРТ ( $v=1.7 \cdot 10^{-3}$  см/с), оцененной в работе [Фирстов и др. 2016].

### 3.3. Поведение плотности потока радона в пункте ПРТ во временной окрестности землетрясений с магнитудой более 6 района полуострова Камчатка

В опорном пункте ПРТ регистрация ОА Rn ведется с конца 1997 г., а регистрация ППР – с сентября 2011 г. (рисунок 2.7). В этом разделе рассмотрены связи параметров радонового поля, зарегистрированных в пункте ПРТ за период 2011–2016 гг., с сейсмичностью Камчатского региона и некоторыми геофизическими процессами, имеющими сезонный ход [Фирстов, Макаров, Глухова, 2017б].

На рисунке 3.16 приведена схема расположения пунктов регистрации подпочвенных газов на Петропавловск-Камчатском геодинамическом полигоне и карта эпицентров землетрясений с магнитудой  $M > 6$ , произошедших в период с 1 августа 2011 г. по 1 июля 2016 г. В таблице 3.3 приведен каталог этих землетрясений, так же землетрясений меньшей магнитуды, для которых были зарегистрированы аномалии в поле подпочвенного Rn.

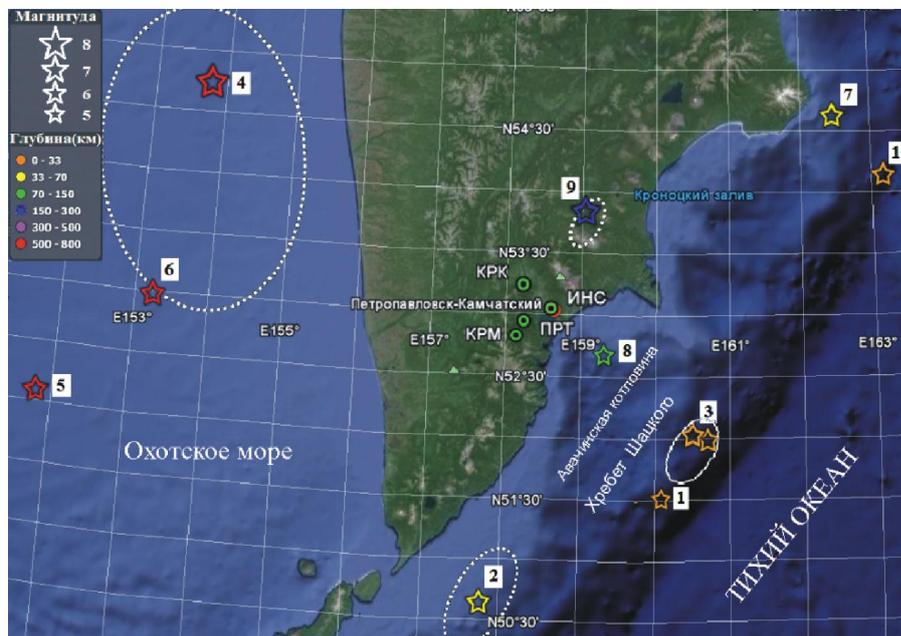


Рисунок 3.16 – Расположение пунктов мониторинга подпочвенных газов и карта эпицентров землетрясений с магнитудой  $M > 6$ , произошедших в районе полуострова Камчатка в период август 2011 г.– июль 2016 г. (номера – согласно таблице 3.3). Пунктиром отмечены контуры размеров очагов, ооконтуренных  $2\sigma$  эллипсом рассеяния [Чебров и др., 2013а,б, 2016].

ИНС – скважина ИНС-1 вблизи здания ИВиС ДВО РАН; ПРТ – опорный пункт, долина ручья Коркина, пос. Паратунка; КРМ – стационар “Верхнепаратунский” ИВиС ДВО РАН, пойма реки Карымшина; КРК – район поселка Северные Коряки, пойма р. Гаванка

Таблица 3.3 – Каталог землетрясений района полуострова Камчатка с  $M > 6$  за период август 2011 г. – июль 2016 г.

№	Дата дд.мм.гггг	Время чч:мм:сс	$\varphi^\circ$ , с.ш.	$\lambda^\circ$ , в.д.	$M$ (NEIC)	$H$ , км	$R_{ПРТ}$ , км	Примечание
1	15.10.2012	1:18	51.53	160.08	5.6	44	200	Западный склон Южного блока хребта Шацкого. Предвестник в ОА Рп, в пункте ПРТ
2	28.02.2013	14:05	50.67	157.77	6.9	61	260	Юго-восточное побережье Камчатки
3	19.05.2013	18:44	52.01	160.69	6.1	50	200	Основные события роевой последовательности 19–23 мая на западном склоне северного блока хребта Шацкого
	21.05.2013	5:43	52.05	160.49	6.1	48	180	
3	24.05.2013	5:44	54.75	153.78	8.3	630	350	Охотоморское глубокое мегаземлетрясение и его афтершоки
5	24.05.2013	14:56	52.11	151.8	6.7	642	450	
6	01.10.2013	3:38	52.99	153.25	6.7	605	330	
7	12.11.2013	7:03	54.63	162.45	6.4	72	330	Вблизи Кроноцкого полуострова
8	19.02.2015	16:32	52.69	159.31	5.4	90	77	Землетрясение в Авачинской котловине
9	30.01.2016	3:25	53.85	159.04	7.2	178	110	Жупановское землетрясение
10	20.03.2016	22:50	54.14	163.14	6.4	43	350	Глубоководный желоб на траверсе Кроноцкого полуострова

*Примечание –  $H$  – глубина очага землетрясения,  $R_{ПРТ}$  – расстояние от эпицентра до пункта ПРТ,  $M$  – магнитуда.*

У юго-восточного побережья Камчатки 28 февраля 2013 г. в 14 ч 05 мин произошло землетрясение с  $M = 6.9$ . Землетрясение, очаг которого располагался на глубине 60 км в 260 км к югу от г. Петропавловск-Камчатского, ощущалось в районе ПРТ с интенсивностью 4 балла. В очаговой области землетрясения в течение трех месяцев были зарегистрированы около 200 афтершоков с энергетическим классом  $K_S = 5.8–15.1$ . На основании облака эпицентров афтершоков размер очага оценивается эллипсоидом рассеивания с  $2\sigma$  границей длиной 90 км и шириной 40 км [Чебров и др., 2013а].

Западнее от полуострова Камчатка в Охотском море 24 мая в 05 ч 44 мин произошло сильнейшее глубокое землетрясение ( $H = 630$  км) с  $M = 8.3$ , которое сопровождалось последовательностью афтершоков, что нетипично для землетрясений с такой глубиной. Интенсивность сотрясения от этого события в районе ПРТ составляла 5 баллов. За 10 дней после основного события, в его очаговой области зарегистрировано 70 землетрясений с  $K_S = 9.0–11.8$  в диапазоне глубин 425–720 км. На основании облака эпицентров афтершоков размер очага оценивается эллипсоидом рассеивания с  $2\sigma$  границей длиной 300 км и шириной 170 км (рисунок 3.16). Через 9 часов после основного события в 14 ч 56 мин произошло землетрясение с  $M = 6.7$ , эпицентр которого находился за пределами очаговой области. Это

землетрясение оказало существенное влияние на афтершоковый процесс [Чебров и др., 2013б]. Землетрясение с  $M = 6.7$  и глубиной очага 605 км произошло на границе очаговой области 01 октября 2013 г.

Перед Охотоморским землетрясением на западном склоне северного блока Хребта Шацкого 18–24 мая произошла роевая последовательность землетрясений с двумя событиями максимальной магнитуды  $M = 6.1$ .

Следующее сильное событие с  $M = 7.2$  и  $H = 177$  км произошло под восточным побережьем Камчатки 30.01.2016 г. в 03 ч 25 мин. Эпицентральная область, очерченная афтершоками, длиной 50 км и шириной 25 км располагалась в районе долины реки Жупанова. Предвестники этого землетрясения в поле ПР подробно описаны в разделе 3.2.

На рисунке 3.17а показана динамика ППР в пункте ПРТ. Полукасовые отсчеты значений ППР с помощью децимации усреднялись в 12-часовом интервале, а затем скользящим средним в пятисуточном окне. Обработка временных рядов проводилась с помощью программы WinABD [Дещеревский и др., 2016]. С июня 2015 г по январь 2016 г. регистрация в точке ПРТ\_3 не велась в силу того, что она была затоплена грунтовыми водами после сильного циклона в июне месяце. По техническим причинам ее удалось восстановить только к концу декабря 2015 г.

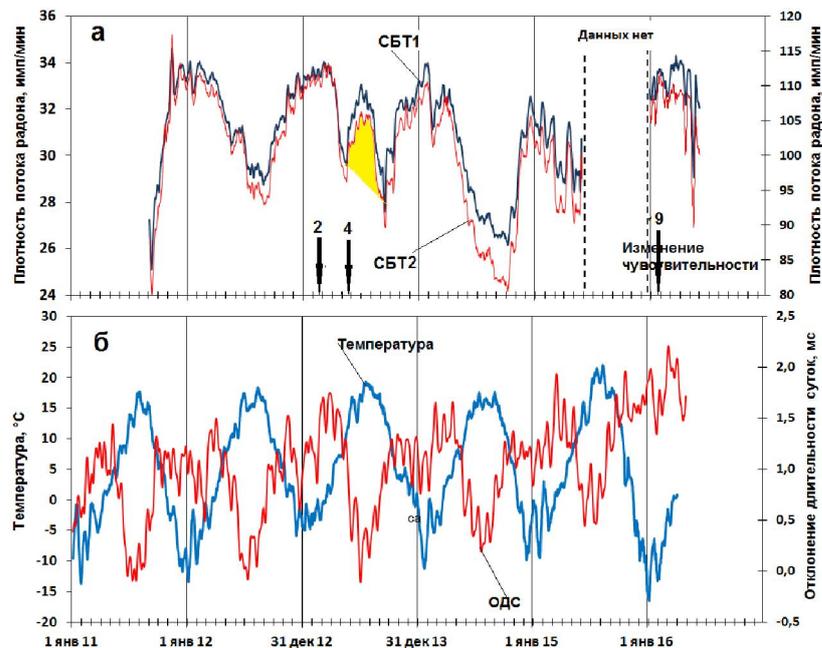


Рисунок 3.17 – Динамика ППР с поверхности земли в пункте ПРТ в период август 2011 г. – июль 2016 г., для кривой после пунктирных линий правая шкала (а), температура воздуха и отклонение длительности суток за период январь 2011 г. – июль 2016 г. (б). Стрелками отмечены времена наиболее сильных землетрясений согласно таблице 3.3.

На трехлетнем периоде четко выделяется сезонный ход ППР с зимним максимумом и летним минимумом. Обычно сезонный ход подпочвенных газов связывается с проницаемостью верхней толщи грунта за счет сезонного хода температуры воздуха [Фирстов, Рудаков, 2003]. Однако, как следует из эксперимента, выполненного на территории РФ по исследованию формирования радоновых полей в грунтовых массивах, на сезонный ход ППР также влияет ротационный режим планеты [Маренный и др., 2015а,б]. С целью проверки зависимости сезонного хода от одной из двух названных выше причин, на рисунке 3.17б приведены кривые сезонного хода температуры в пункте ПРТ и отклонения длительности суток (ОДС), полученные по данным Международной службы земного вращения и эталонных мер (Earth Rotation and Reference System Service: [сайт]. URL: <http://www.iers.org/>). Обе кривые построены с усреднением скользящим средним в 10-суточном окне.

На температурной кривой четко выделяются резкие перепады в зимние месяцы, связанные с приходом южных теплых циклонов. Так как Луна влияет на скорость вращения Земли, то на кривой ОДС хорошо просматривается ритмичность с лунным синодическим месяцем (29.53 суток). С целью фильтрации «высокочастотных колебаний» проводилось осреднение скользящим средним окном в 30 дней. Затем рассчитывался наибольший коэффициент кросс-корреляции ( $r$ ) между временными рядами со сдвигом  $\pm 100$  лагов (лаг – одни сутки). За период сентябрь 2011 г. – июнь 2015 г. для временных рядов ППР–температура  $r = -0.68$  при сдвиге -11.6 суток, а для временных рядов ППР–ОДС  $r = 0.38$  при сдвиге -29.8 суток. Хотя оба коэффициента корреляции значимы, автор отдает предпочтение зависимости ППР от температуры воздуха, что было показано ранее в работе [Фирстов, Рудаков, 2003] и разделе 2.7.

Относительно сезонного хода 2012, 2014 годов, на кривой ППР в 2013 г. выделяется аномальное поведение с середины апреля по сентябрь (выделено желтым цветом на рисунке 3.17а). Начало этого периода совпадает с весной, когда с ростом температуры начинается таяние снега и повышается УГВ, который также влияет на миграцию  $R_n$  к дневной поверхности. Следует отметить, что в 2013 г. уменьшение ППР в весенний период происходит с большим градиентом, по сравнению с кривыми для 2012 и 2014 гг.

Рассмотрим более подробно поведение ППР с поверхности и вариаций ОА  $R_n$  в 2013 г. с использованием исходных данных пункта ПРТ. Регистрация ОА  $R_n$  осуществлялась с дискретностью 10 мин., а ППР с дискретностью 30 мин. На нижней панели рисунка 3.18 показаны исходные кривые ППР, осредненные скользящим средним в суточном окне.

Землетрясение №2 ( $M=6.9$ ) не нашло отклика ни на одной кривой (рисунок 3.18), а подъем с середины апреля УГВ четко проявился на всех каналах. Как и ранее, в зоне аэрации (ГС1) в этот период за счет «поршневого» воздействия УГВ произошло увеличение ОА  $R_n$ , а на других

каналах ее уменьшение (ГС5,4,3), также как ППР. Обращает на себя внимание хорошо выраженная «ступенька» на кривых ППР 18 мая, после которой начался почти двухмесячный рост значений ППР с последующим их падением. Ступенька 18 мая с относительной амплитудой  $\delta \approx 7\%$  не может быть объяснена вариациями атмосферного давления, в то время как вариации ОА Rn, зарегистрированные датчиками ГС4, ГС5, и ППР в середине августа, связаны с резким изменением атмосферного давления на 30 гПа в течение нескольких часов при прохождении мощного циклона.

Не исключено, что формирование «ступеньки» связано с изменением напряженно-деформированного состояние геосреды на Камчатке, которое стало триггером и для роевой последовательности 19–24 мая на западном склоне северного блока хребта Шатского.

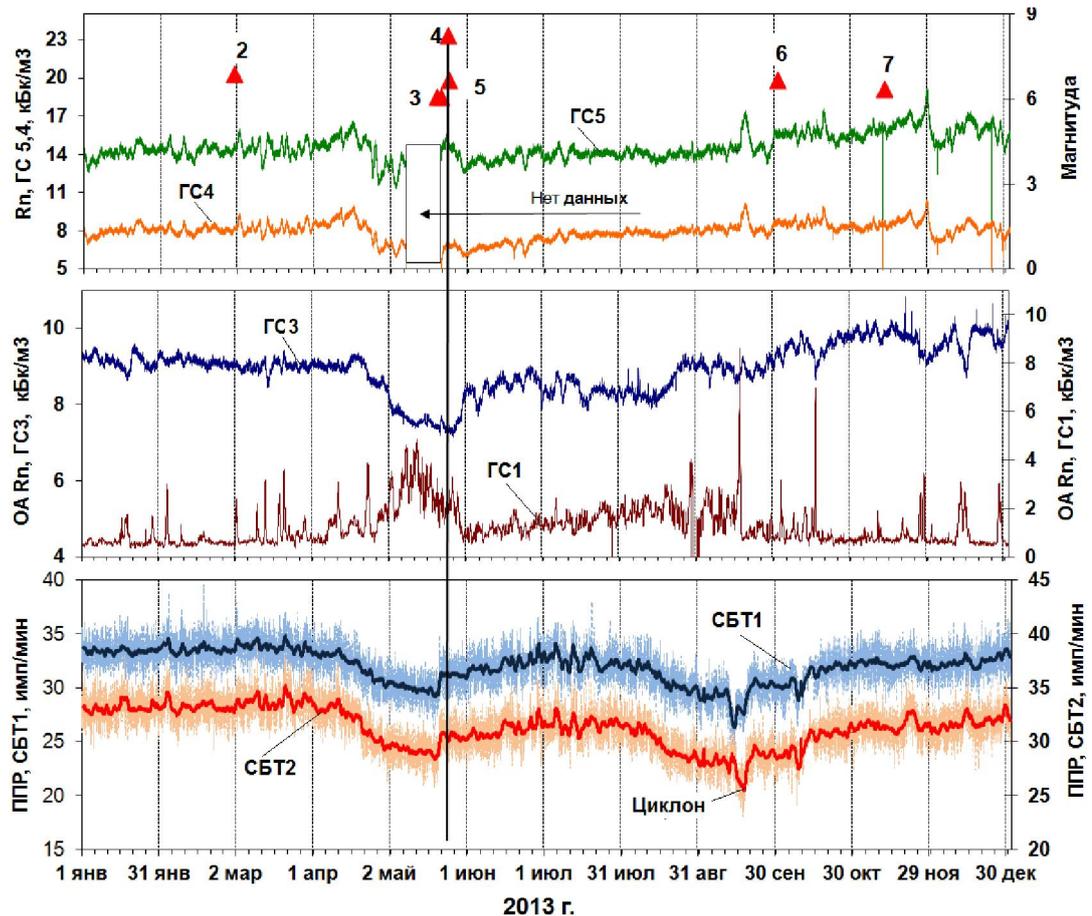


Рисунок 3.18 – Динамика ОА Rn и ППР в пункте ПРТ в 2013 г. Цифрами отмечены землетрясения, согласно таблице 3.3.

В работах [Яковлева, Каратаев, 2007; Паровик, Фирстов, 2009] теоретически показано, что величина ППР с поверхности земли чувствительна к изменениям скорости адвекции подпочвенного радона, поэтому ее регистрация более предпочтительна по сравнению с регистрацией ОА Rn. ППР реагирует как на вариации метеорологических величин (атмосферное давление, температура воздуха), так и на изменение напряженно-

деформированного состояния геосреды, за счет его влияния на проницаемость грунта зоны аэрации.

По-видимому, несмотря на то, что на датчиках ОА Rn 18 мая 2013 г. нет видимых вариаций, перед Охотоморским землетрясением, которое ощущалось даже в европейской части РФ, возникновение «ступеньки» на кривой ППР можно объяснить процессами перестройки поля напряжений на последней стадии подготовки этого землетрясения. Не исключено, что длиннопериодное бухтообразное возмущение (июнь-август) связано с изменением проницаемости грунта после пятибалльного сотрясения в районе поселка Паратунка [Чебров и др., 2013б], вызванного Охотоморским землетрясением [Фирстов, Макаров, Глухова, 2017б].

Рассмотрим поведение параметров радонового поля (ОА Rn и ППР) перед сильными землетрясениями полуострова Камчатка и некоторыми землетрясениями Авачинского залива согласно таблице 3.3.

*Землетрясение 15.10.2012 г.,  $M = 5.6$ ,  $H = 44$  км*, подробно рассмотрено в разделе 3.1. Эпицентр данного землетрясения располагался на западном склоне Южного блока хребта Шатского. На сети пунктов мониторинга подпочвенного радона на Петропавловск-Камчатском полигоне перед этим землетрясением зарегистрированы аномалии с относительной амплитудой  $\delta = 25\text{--}300\%$ . Определенный по диапазону времен прихода вступлений аномалий на треугольник станций азимут на источник удовлетворительно совпадает с направлением на эпицентр землетрясения. Кроме того, на наклонномерной станции «Петропавловск» зарегистрировано бухтообразное возмущение земной коры с максимальным наклоном 1.5 мкрад, по времени совпадающее с аномалиями в подпочвенном радоне. Эта аномалия рассматривается как краткосрочный предвестник землетрясения со временем упреждения 9 суток, обусловленный откликом на деформирование блочных массивов горных пород в результате прохождения в земной среде сигнала типа уединенной деформационной волны [Фирстов и др., 2013].

На рисунке 3.19 видно, что аномалия хорошо прослеживается на датчиках всех трех точек пункта ПРТ. Относительная амплитуда аномалии на кривых ППР составила  $\delta = 7.5\%$ , а на датчиках ОА Rn в этой точке (ГС4, ГС5)  $\delta = 80\%$ . Для данного периода характерно незначительное влияние на динамику радона атмосферного давления [Фирстов, Макаров, Глухова, 2017б].

Обращает на себя внимание четко выраженный пик 17-19 октября на всех кривых для газоразрядных счетчиков зоны аэрации (ГС1, ГС2, ГС4, ГС5) и отрицательное бухтообразное поведения кривых датчика ГС3 в зоне полного влагонасыщения и на обоих счетчиках СБТ. Эти вариации параметров радонового поля связаны с постсейсмическими эффектами, когда в результате воздействия сейсмических волн на эманурующий горизонт происходит в одних случаях увеличение ОА Rn, а в других – уменьшение. Ранее уже отмечалось [Фирстов, Рудаков,

2003], что если в зоне аэрации за счет падения атмосферного давления ОА Rn возрастала (ГС1), то в зоне полного влагонасыщения она падала (ГС3).

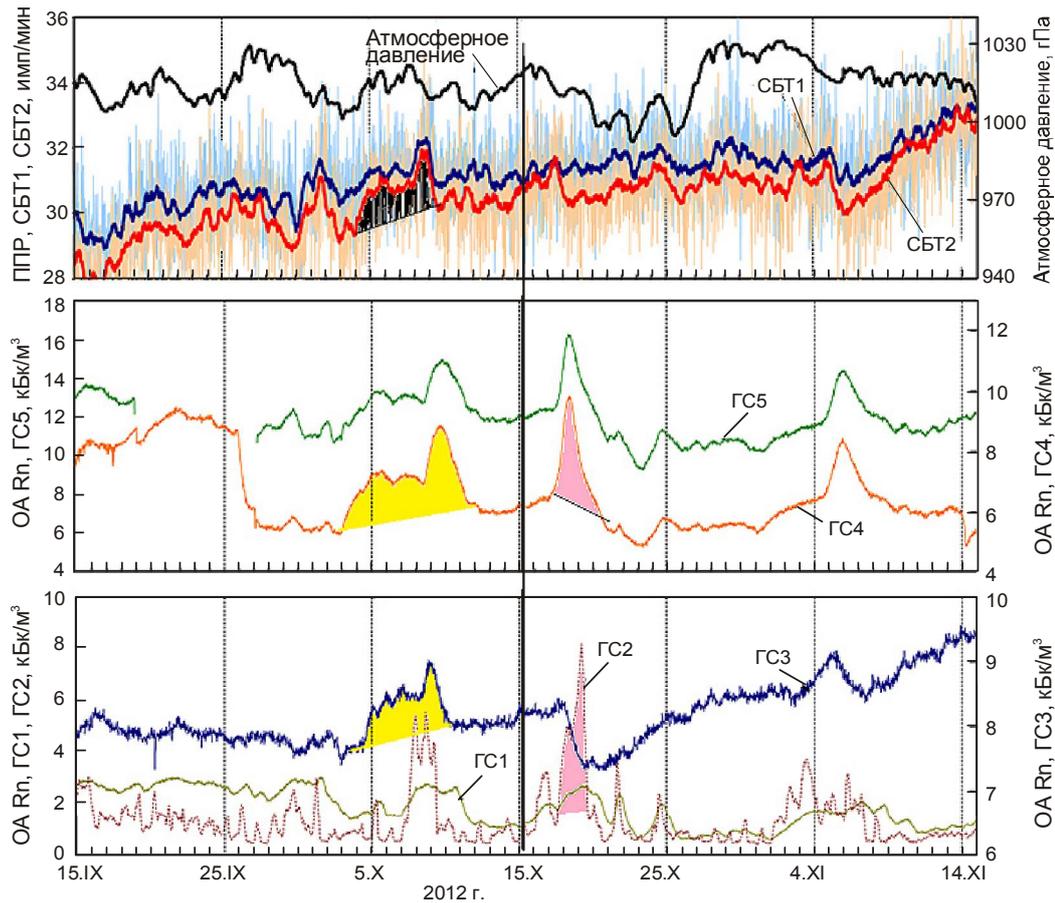


Рисунок 3.19 – Динамика параметров радонового поля в пункте ПРТ до и после землетрясения 15 октября 2012 г. с  $M=5.6$ . Вертикальной чертой отмечен момент возникновения землетрясения.

**Землетрясение 19.02.2015 г.,  $M=5.6$ ,  $H=90$  км** – сравнительно глубокое землетрясение в Авачинской котловине на удалении 77 км от пункта ПРТ. Перед землетрясением 19.02.2015 г. предвестниковая аномалия длительностью 5 суток четко выделяется в динамике радона в зоне полного влагонасыщения (ГС3,  $\delta_{\text{макс}}=20\%$ ), и достаточно слабо в зоне аэрации (ГС1) точки, расположенной на расстоянии 23 м выше по склону на два метра (рисунок 3.20). В связи с тем, что в ПРТ\_1 слой аллювиально-делювиальных отложений имеет большую толщину по сравнению с ПРТ\_2, начало аномалии сдвинуто на 32 ч. Это дало возможность оценить скорость миграции радона к поверхности ( $v=1.7 \cdot 10^{-3}$  см/с) [Фирстов и др., 2016]. Данная аномалия очень слабо просматривается на кривых ППР, где ее относительная амплитуда составляет около 3 % [Фирстов, Макаров, Глухова, 2017б].

Для рассмотренного периода времени визуально прослеживается фазовая корреляция кривых ОА Rn для датчиков ГС1-ГС4 с атмосферным давлением. Наибольший коэффициент корреляции между атмосферным давлением и кривыми ОА Rn варьирует в пределах 0.3 - 0.5

при сдвиге 7-12 часов. То есть увеличение ОА Rn приходится на ветвь падения атмосферного давления, где наблюдается наибольший градиент.

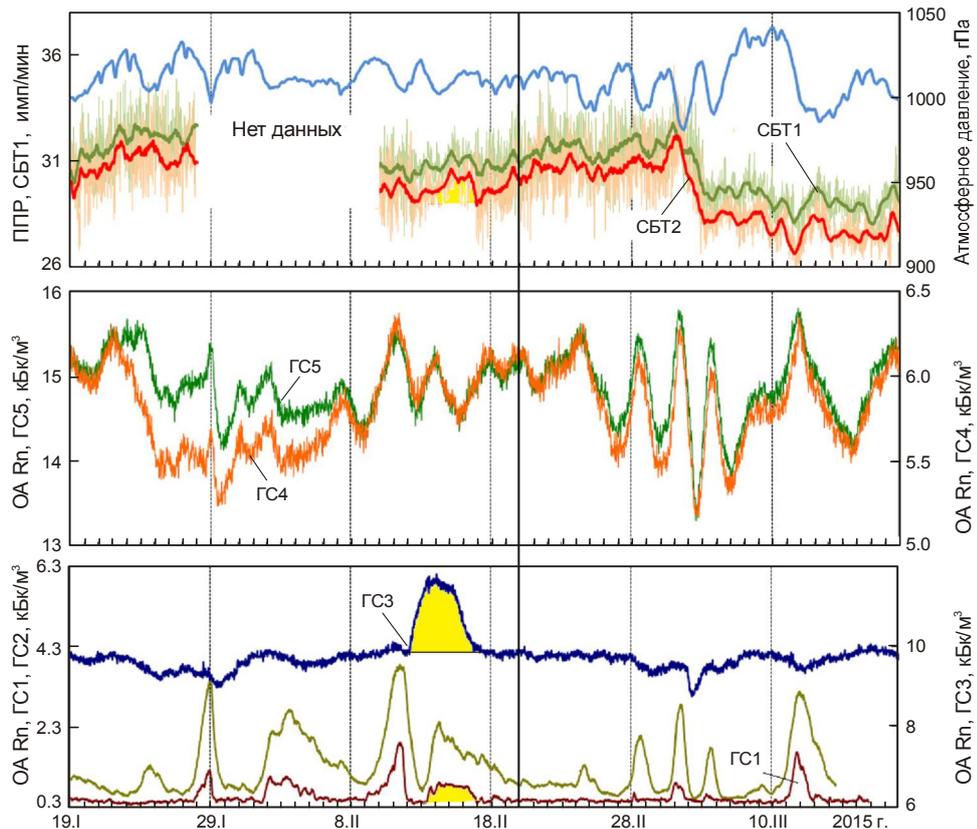


Рисунок 3.20 – Динамика параметров радонового поля в пункте ПРТ до и после землетрясения 19 февраля 2015 г. с  $M=5.6$ . Вертикальной чертой отмечен момент возникновения землетрясения.

**Жупановское землетрясение 30.01.2016 г. с  $M=7.2$** , гипоцентр которого находился в 110 км от ПРТ на глубине 177 км, ощущалось в ПРТ силой 4-5 баллов, а статические вертикальные косейсмические смещения пунктов GNSS района Петропавловск-Камчатского геодинимического полигона, были заключены в диапазоне  $-(4-12)$  мм [Чебров и др., 2016]. Наиболее подробно особенности динамики подпочвенных газов до этого события рассмотрены в разделе 3.2. На трех пунктах сети радонового мониторинга КРК, ПРТ1 и ИНС на кривых ОА Rn синфазно за 10 суток перед землетрясением появляется бухтообразное отрицательное возмущение длительностью 6 суток, которое отслеживается также в концентрации двуокиси углерода и молекулярного водорода в пункте ИНС. В пункте ПРТ также наблюдается аномалия, но более кратковременная, длительностью двое суток 20 и 21 января. На динамику подпочвенного Rn в зоне аэрации существенное влияние оказывают вариации атмосферного давления. Как видно на рисунке 3.21 (верхняя панель), связь аномалии с атмосферным давлением визуально не просматривается.

Относительная амплитуда для ППР составляет  $\delta = -24\%$ , в то время как для зоны влагонасыщения (ГС3)  $\delta = 100\%$ . На кривых ОА Rn для датчиков ГС4 и ГС5 (рисунок 3.21, средняя панель), расположенных рядом с датчиками ППР, аномалия не выделяется.

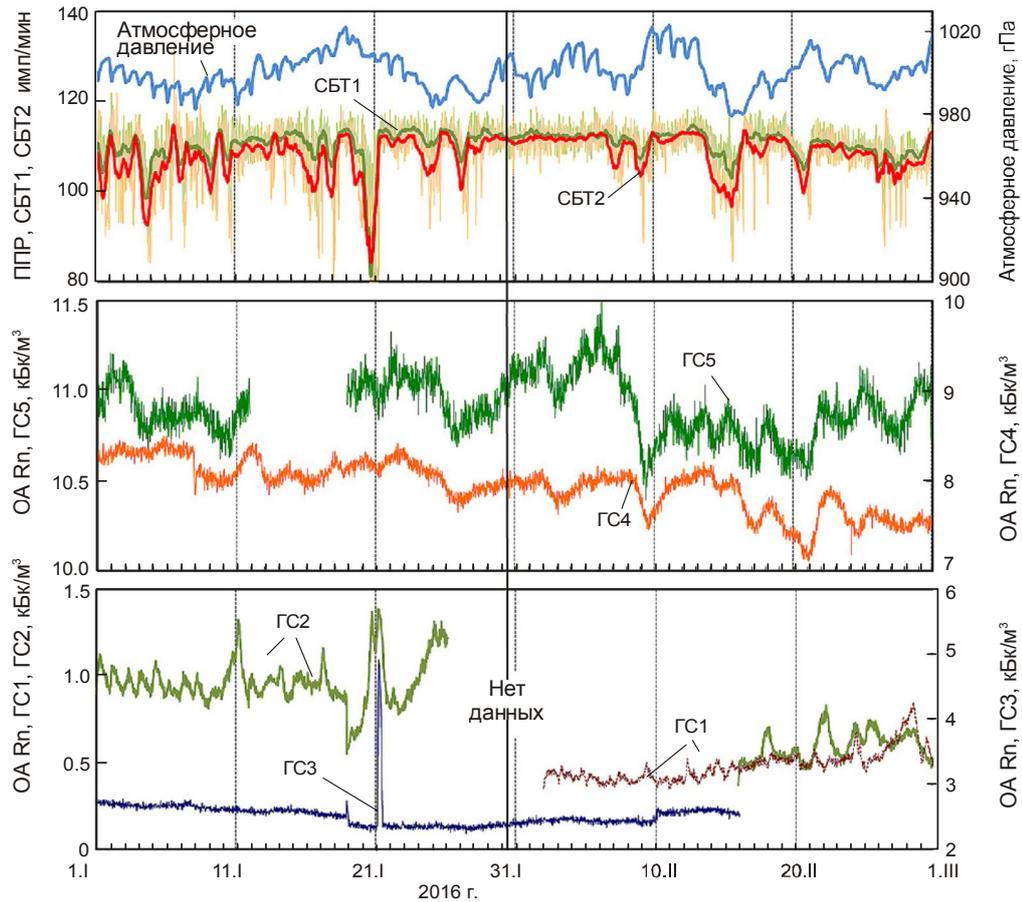


Рисунок 3.21 – Динамика параметров радонового поля в пункте ПРТ до и после землетрясения 30 января 2016 г. с  $M = 7.2$ . Вертикальной чертой отмечен момент возникновения землетрясения.

**Землетрясение 20.03.2016 г.,  $M = 6.4$ ,  $H = 43$  км** произошло в 350 км от пункта ПРТ. За четверо суток перед этим землетрясением на кривых ОА Rn датчиков ГС4 и ГС5 и кривых ППР наблюдается слабо выраженная бухтообразная аномалия отрицательной полярности. Относительная амплитуда аномалии для ОА Rn составила  $\delta = -6\%$ , в то время как для ППР  $\delta = -10\%$ . Как видно на рисунке 3.22 (две нижние панели), вариациями метеорологических величин эти аномалии объяснить нельзя. В то же время аномалия не выделяется на кривых других датчиков в пункте ПРТ, расположенных на расстоянии 13 м вниз по склону (ГС3) и 8 м вверх по склону (ГС1, ГС2) [Фирстов, Макаров, Глухова, 2017б].

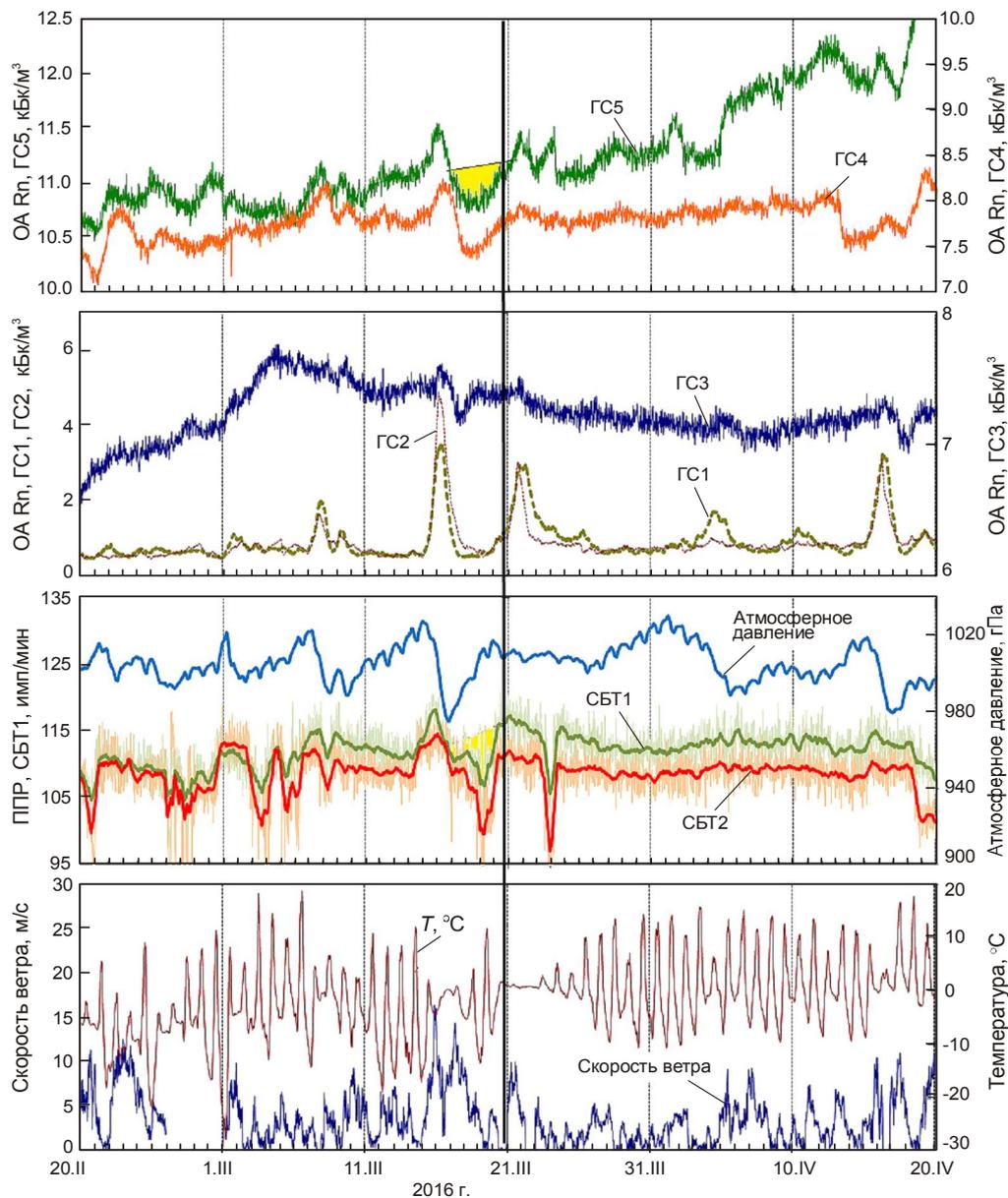


Рисунок 3.22 – Динамика параметров радонового поля в пункте ПРТ до и после землетрясения 20 марта 2016 г. с  $M = 6.4$ . Вертикальной чертой отмечен момент возникновения землетрясения.

Процесс миграции Rn к дневной поверхности представляет большой интерес и до конца не изучен. Поэтому многолетние натурные наблюдения, проведенные в пункте ПРТ, за параметрами поля подпочвенного Rn в ЗДВ разлома и их отклик на изменения напряженно-деформированного состояния верхнего слоя грунта на последней стадии подготовки сильных землетрясений, дают возможность по новому взглянуть на процесс миграции Rn к дневной поверхности.

Из приведенных примеров видно, что в ЗДВ разлома вертикальные неоднородности даже на расстоянии в 21 м существенно влияют на миграцию Rn к дневной поверхности, чем

объясняются случаи регистрации предвестниковых аномалий только в одной из трех точек пункта ПРТ.

По-видимому, также существуют и горизонтальные мелкомасштабные неоднородности, влияющие на миграцию радона к дневной поверхности. Об этом свидетельствует уникальный эксперимент по измерению ОА Rn в порах грунта совместно с измерениями температуры, влажности на различных глубинах до 10 м, проведенный в 2012-2014 гг. на четырех экспериментальных площадках, расположенных в открытой местности и в подвалах зданий. Площадки были организованы в различных районах РФ и разнесены на тысячи километров [Маренный и др., 2014]. На основании этого эксперимента было выявлено, что вопреки распространенному мнению, не наблюдается монотонного увеличения ОА Rn с глубиной, как следует из модели однородного кларкового содержания радиоактивных элементов – модель с распределенными параметрами [Рудаков, 2009]. Распределение радона в порах по глубине грунта определяется его эманулирующей способностью, в основном, обусловленной активностью  $^{226}\text{Ra}$ , а также проницаемостью, которые могут подавляться из-за присутствия воды в поровом пространстве [Маренный и др., 2015a]. Кроме того, иногда отмечаются тепловые всплески в определенных слоях грунта, которые на фоне действия других факторов, также могут оказывать влияние на скорость миграции радона к дневной поверхности [Маренный и др., 2015a]. Таким образом, в результате детального натурального эксперимента показана значительная роль тонкой горизонтальной слоистости в скорости миграции радона, которая не находит отражения на сейсморазведочных профилях.

Как вертикальные, так и горизонтальные неоднородности формируют узлолокализованные зоны стока радона в атмосферу, которые по-разному реагируют на изменения напряженно-деформированного состояния верхнего слоя грунта [Фирстов, Макаров, Глухова, 2017б].

Выделенные аномалии ППР имеют малую амплитуду и визуально трудно диагностируются. Исключением являются самые сильные из рассмотренных сейсмических событий района полуострова Камчатка. Следует отметить, что ППР по сравнению с ОА Rn оказалась более чувствительна к изменениям напряженно-деформированного состояния среды перед глубоким Охотоморским землетрясением с  $M = 8.3$ . О чем свидетельствует возникновение «ступеньки» на кривой перед этим землетрясением, а также появление постсейсмического эффекта, связанного с изменением проницаемости грунта после 5-балльного сотрясения в районе поселка Паратунка [Чебров и др., 2013б], вызванного этим землетрясением [Фирстов, Макаров, Глухова, 2017б].

В работе [Фирстов, Рудаков, 2003] показано, что даже в пределах одного региона влияние температуры воздуха на сток радона в атмосферу проявляется различно. Для пункта ПРТ

выявлена сезонная зависимость ППР от температуры с коэффициентом корреляции  $r = -0.68$  при сдвиге  $-11.6$  суток. Сезонная зависимость ППР от температуры, по-видимому, характерна для пунктов Петропавловск-Камчатского геодинамического полигона, расположенных в аллювиально-делювиальных отложениях речных долин.

### **3.4. Удаленные краткосрочные предвестники перед сильными землетрясениями с магнитудами более 7.5 северо-западной окраины Тихого океана**

Под «удаленными» предвестниками подразумеваются аномалии, регистрируемые перед землетрясениями с  $M > 6$  на расстояниях от очагов землетрясений более 1000 км. Глобальные возмущения различных геофизических полей перед сильными землетрясениями отмечались во многих работах. Так, случаи аномальных сейсмогравитационных колебаний отмечаются в работе [Линьков и др., 1990], а многочисленные случаи аномальных вариаций кажущегося электрического сопротивления на Гармском полигоне перед удаленными землетрясениями приводятся в работе [Сидорин, 1992]. «Удаленные» предвестниковые аномалии, как правило, регистрируются от нескольких десятков дней до нескольких часов перед сильными землетрясениями планеты. Примеры их регистрации на Камчатке и в других регионах Земли приведены в работе [Широков и др., 2010]. На пунктах мониторинга почвенных газов Петропавловск-Камчатского геодинамического полигона такие «удаленные» предвестники регистрируются как водородными, так и радоновыми датчиками.

В период 1999–2003 гг. в пункте ПРТ (см. рисунок 2.1), расположенном в ЗДВ разлома, на фоне квазипостоянного сигнала были зарегистрированы 7 визуально диагностируемых аномальных сигналов  $H_2$  длительностью от 1.5 до 6 ч с максимальной амплитудой, превышающей фон в 2–14 раз. Была выявлена статистически значимая связь аномальных сигналов с мировыми землетрясениями  $M \geq 7.6$  [Фирстов, Широков, 2005].

В районе средних Курильских островов в западной области внешней стороны сейсмофокальной зоны на ее перегибе 15.11.2006 г. в 11 ч 15 мин произошло Симуширское землетрясение с  $M = 8.3$ , с координатами  $46.57^\circ$  с.ш.,  $153.29^\circ$  в.д. (рисунок 3.23).

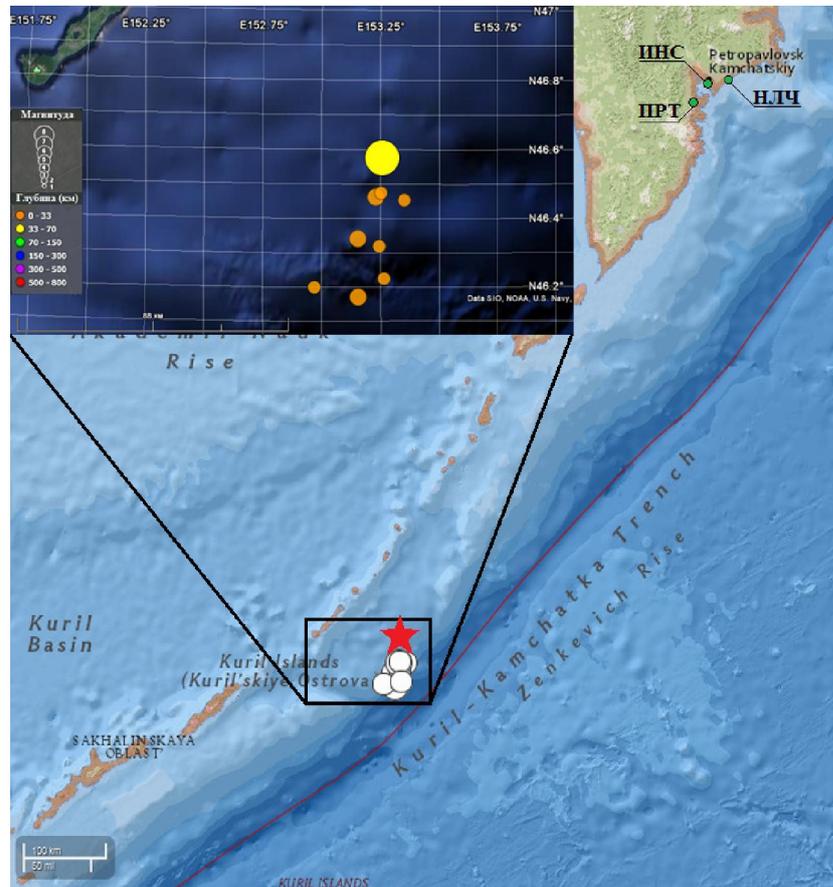


Рисунок 3.23 – Карта эпицентров Курильских землетрясений с  $M > 5.3$  и эпицентр Симуширского землетрясения с  $M = 8.3$  (выделено звездой).

В пункте ПРТ, где в одном шурфе двумя приборами проводилось измерение  $H_2$ , за двое суток перед Симуширским землетрясением синхронно на обоих датчиках наблюдается биполярный импульс с  $\delta = 75\%$  [Широков и др., 2014] (рисунок 3.24а). В пункте НЛЧ за 12 дней перед землетрясением на двух разноглубинных датчиках начался рост ОА  $R_n$  (рисунок 3.24б).

В пункте ИНС аномалия зарегистрирована в поле подпочвенного  $R_n$  4 датчиками (рисунок 3.24в), расположение которых приведено на рисунке 2.9. Здесь ОА  $R_n$  начала возрастать за 5 суток и достигла к моменту события  $\delta = 150\%$ . Аномалии нельзя объяснить влиянием метеорологических факторов, так как в этот период не отмечено сильных вариаций атмосферного давления (рисунок 3.24г). Предполагается, что выделенные аномалии в концентрации подпочвенных газов являются удаленным предвестником Симуширского землетрясения с  $M = 8.3$ .

Перед вторым Симуширским землетрясением с  $M = 8.1$ , произошедшим в том же районе 13.01.2007 г. аномалий в концентрации подпочвенных газов выявлено не было

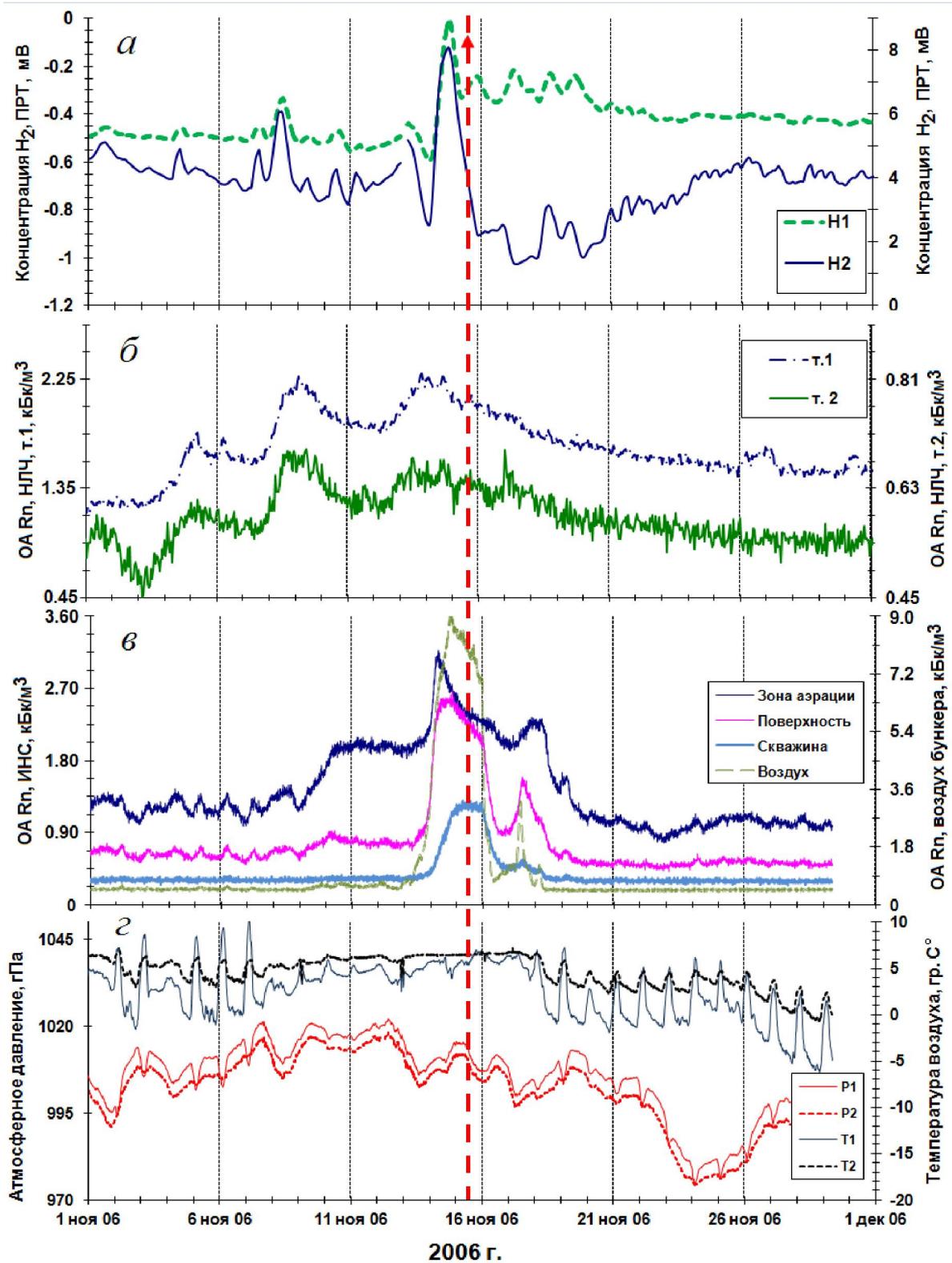


Рисунок 3.24 – Кривые OA Rn и концентрации молекулярного водорода в пунктах мониторинга подпочвенных газов на Петропавловск-Камчатском геодинамическом полигоне перед Симуширским землетрясением: *a* – молекулярного водорода в пункте ПРТ; *б* – НЛЧ; *в* – ИНС; *г* – метеорологические величины в бункере и контейнере в пункте ИНС (расположение пунктов см. рисунке 2.2). Прерывистой вертикальной линией отмечен момент возникновения Симуширского землетрясения 15.11.2006 г. с  $M = 8.3$ .

Большой интерес представляет анализ временных рядов водородно-радонового мониторинга перед самым мощным за всю историю инструментальных наблюдений в Японии цунамигенным землетрясением 11 марта 2011 г. с магнитудой  $M = 9.0$ , произошедшим вблизи северо-восточного побережья острова Хонсю на удалении 2100 км от опорного пункта ПРТ.

В период январь-март 2011 г. на Петропавловск-Камчатском геодинамическом полигоне работала сеть из четырех пунктов регистрации подпочвенных газов (рисунок 3.25). На рисунке 3.26 показана динамика ОА Rn в пунктах сети мониторинга подпочвенных газов за период январь-март 2011 г. В сезонном ходе концентраций подпочвенных газов в зимний период пункт ИНС имеет минимальные значения и мало подвержен вариациям. Однако, с 11 февраля поведение ОА Rn по всем каналам и  $H_2$  в скважине (ИНС) можно назвать аномальным (рисунок 3.26).



Рисунок 3.25 – Расположение пунктов регистрации концентрации подпочвенных газов и эпицентров роя землетрясений, произошедших накануне землетрясения Тохоку:

1 – пункты сети: НЛЧ – Налычево; ИНС – пункт на базе скважины НИС-1 вблизи здания ИВиС ДВО РАН; ПРТ – опорный пункт, долина ручья Коркина, пос. Паратунка; КРМ – Карымшинский стационар ИВиС ДВО РАН; 2 – обсерватория «Карымшина» КФ ЕГС РАН (КРМ1); 3 – направление на источник возмущения ОА Rn перед землетрясением по данным сети радонового мониторинга.

Несмотря на резкое падение атмосферного давления 11 февраля в связи с приходом циклона, ОА Rn не увеличилась, а резко уменьшилась. Это говорит о существенном изменении передаточной функции атмосферное давление – ОА Rn в подпочвенном газе. В пункте ИНС с 11 по 24 февраля на основании накопленного опыта достаточно уверенно выделяются бухтообразные возмущения в зоне аэрации и на поверхности грунта (рисунок 3.26a), а в стволе

скважины с 11 по 18 февраля зарегистрирована водородная аномалия (рисунок 3.26д). Кроме этого, выделяются резкие суточные колебания ОА Rn в воздухе бункера (рисунок 3.26а).

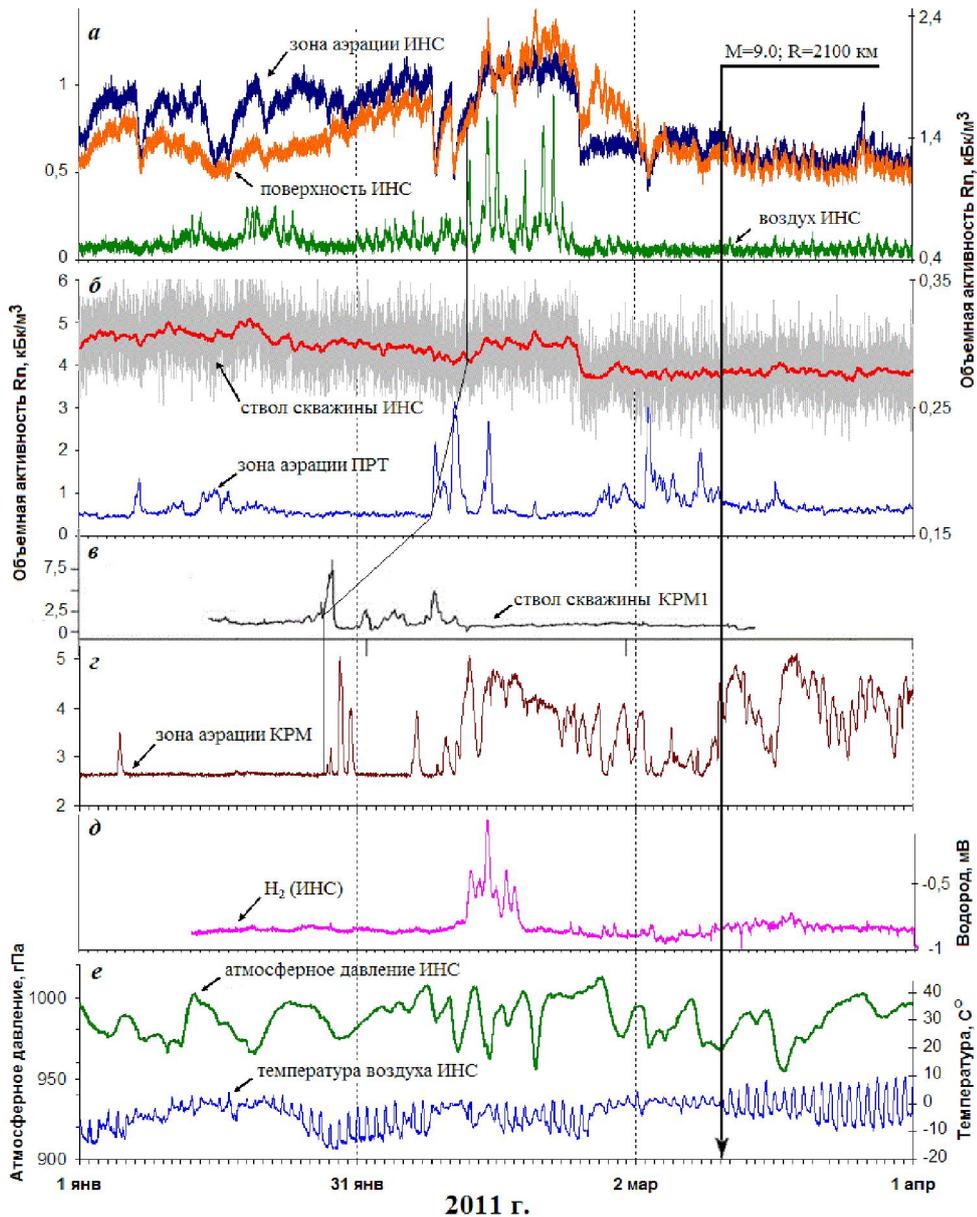


Рисунок 3.26 – Динамика метеорологических величин и концентрации почвенных газов на сети пунктов мониторинга на Петропавловск-Камчатском геодинамическом полигоне за период январь - апрель 2011 г.:

*a* – ОА Rn в трех точках пункта ИНС, *б* – ОА Rn в зоне аэрации в пункте ПРТ, стволе скважины в пункте ИНС, *в* – ОА Rn в пункте КРМ1 в скважине [Руленко, Кузьмин, 2013], *г* – ОА Rn в зоне аэрации в пункте КРМ, *д* – концентрация молекулярного водорода в пункте ИНС, *е* – атмосферное давление и температура воздуха в пункте ИНС.

Этот факт можно объяснить только тем, что эксхалиция (плотность потока Rn с поверхности) в этот период увеличилась не только за счет увеличения концентрации, но и за

счет изменения скорости конвективного потока в верхнем слое рыхлых отложений. Суточная составляющая в концентрациях газов, регистрируемых датчиками, определяется особенностями конструкции этого пункта наблюдений [Фирстов и др., 2007]. На рисунок 3.26е четко видны суточные колебания атмосферного давления в бункере, двойная амплитуда которых доходит до 15 гПа. Аномальное поведение ОА Rn наблюдается в этот период и в стволе скважины (рисунок 3.26б), что, по-видимому, свидетельствует о возрастании давления под пробкой, которое можно объяснить только подъемом уровня воды в скважине.

Схожие по форме аномалии ОА Rn также выделяются в этот период в зоне аэрации на пунктах ПРТ и КРМ (рисунок 3.26б,г). В пункте КРМ1, расположенном на удалении ~4 км от пункта КРМ (рисунок 3.26в), наблюдались аномалии ОА Rn в скважине глубиной 4 м [Руленко, Кузьмин, 2013]. Эти аномалии сходны по форме и времени вступления с аномалиями на пункте КРМ, что говорит в пользу достоверности их выделения. Исходя из предположения, что аномалии являются откликом на прохождение в земной среде сигнала типа уединенной деформационной волны [Фирстов и др., 2011; Макаров, 2012; Фирстов, 2014], был рассчитан азимут ее прихода (рисунок 3.25) и диапазон скорости ее распространения, который составил  $v_{\text{КАЖ}}=2-2.5$  км/сутки.

Приведенные данные отражают характерные особенности геодинамических процессов, происходивших в этот период в районе Петропавловск-Камчатского геодинамического полигона, а аномалии в динамике ОА Rn и  $\text{H}_2$  можно рассматривать как краткосрочный «удаленный» предвестник землетрясения Тохоку со временем упреждения 42 дня и 28 суток соответственно.

Перед сильными землетрясениями мира с  $M > 7.5$  в поле почвенных газов иногда регистрируются «удаленные» предваряющие аномалии, природа которых остается пока не ясной и в данной работе не рассматривается.

### 3.5. Длиннопериодные аномалии в поле подпочвенного радона

Непрерывные кондиционные временные ряды концентрации подпочвенного  $Rn$  с частотой дискретизации 10-30 минут, были получены после установки цифровых радиометров в пункте ПРТ в октябре 2000 г. Для исследования длиннопериодных вариаций ОА  $Rn$  данные за 15-летний период подвергались барокомпенсации [Любушин, 2007] и усреднению в полусуточном окне, а затем сглаживанию скользящим средним по пяти точкам с целью фильтрации «высокочастотной» составляющей [Фирстов, 2014].

На рисунке 3.27 четко выделяется годовая составляющая ОА  $Rn$ , обусловленная сезонным изменением температуры гелиотермозоны рыхлых отложений и УГВ.

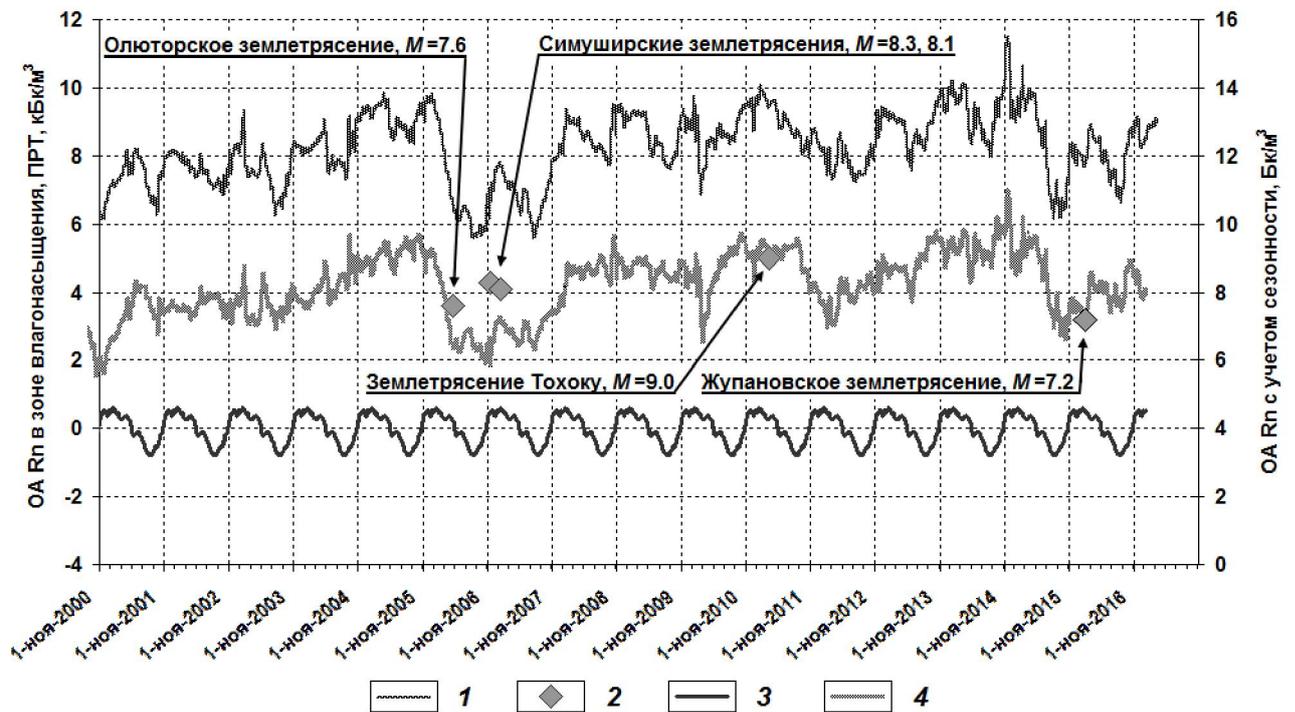


Рисунок 3.27 – Временной ряд ОА  $Rn$  в зоне влагонасыщения (глубина 3 м) в опорном пункте ПРТ, осредненный скользящим средним в пяти суточном окне, аддитивная сезонная модель и кривая за вычетом сезонной составляющей:

1 – осредненные данные, 2 – землетрясения северо-западной окраины Тихого океана с  $M > 7.5$  и Жупановское землетрясение с  $M = 7.2$ , 3 – аддитивная сезонная модель, 4 – кривая ОА  $Rn$  за вычетом сезонной составляющей [Фирстов, Макаров, 2015].

В осенне-зимний период происходит промерзание гелиотермозоны и уменьшение ее проницаемости, приводящей к увеличению ОА  $Rn$  в зоне влагонасыщения (ЗВ). Весной, когда температура воздуха принимает плюсовые значения, за счет инфильтрации талых вод

наблюдается подъем УГВ, который приводит к уменьшению ОА Rn на 20-25%. Последующее уменьшение УГВ сопровождается увеличением столба подпочвенной атмосферы в рыхлых отложениях и, соответственно, резким уменьшением ОА Rn в зоне аэрации и возрастанием её в ЗВ. На Камчатке хорошо выражены два периода подъема УГВ – весенний и осенний. В летний период прогрев гелиотермозоны способствует увеличению проницаемости, особенно в сухую погоду, и увеличению ОА Rn в зоне аэрации [Фирстов, Рудаков, 2003]. С целью выделения долгосрочных предвестников сильных землетрясений, из временного ряда ОА Rn ЗВ вычиталась сезонная компонента по аддитивной модели [Бокс, Дженкинс, 1974], и полученная кривая ОА Rn сопоставлялась с наиболее сильными землетрясениями, произошедшими за период 01.10.2000 – 01.10.2016 гг. (таблица 3.4).

Таблица 3.4 – Землетрясения северо-западной окраины Тихого океана с  $M > 7.5$ .

$M > 7.5$							
	Дата	Время, чч:мм:сс	Координаты		Н, км	M	Область эпицентра землетрясения
			$\varphi$	$\lambda$			
1	20.04.2006	23:52:02	60.94	167.14	22	7.6	Олюторское, север Камчатки
2	15.11.2006	11:14:13	46.58	153.27	39	8.3	Средние Курилы, о. Симушир
3	13.01.2007	4:23:21	46.23	154.55	10	8.1	
4	05.07.2008	02:12:04	53.88	152.89	632	7.7	Охотоморское землетрясение
5	11.03.2011	5:46:24	38.1	142.85	24	9.0	Землетрясение Тохоку, Япония
6	24.05.2013	05:44:48	54.89	153.22	609	8.3	Охотоморское землетрясение

*Примечание –  $\varphi$  – широта, гр. с. ш.;  $\lambda$  – долгота, гр. в. д.; M – магнитуда по данным NEIC (National Earthquake Information Center); Н – глубина очага землетрясения.*

Как видно из таблицы 3.4, в период апрель 2006 г. – январь 2007 г. произошло три события (Олюторское и два Симуширских) с  $M > 7.5$ . За 2.5 года перед ними возникло аномальное возрастание ОА Rn в форме тренда, сменившееся резким бухтообразным падением значений ОА Rn на ~30 % в течение 3 месяцев непосредственно перед Олюторским землетрясением, Низкий уровень сохранялся почти полтора года (рисунок 3.27).

Перед мегаземлетрясением Тохоку, произошедшем в Японии 11.03.2011 г. на расстоянии 2100 км от пункта регистрации, также наблюдался тренд роста значений ОА Rn, который начался в марте 2010 г. и продолжался 8 месяцев до ноября 2010 г. (рисунок 3.27).

С начала 2012 г. наблюдалась тенденция к увеличению ОА Rn, сменившаяся в середине 2015 г. на резкое бухтообразное падение значений ОА Rn на ~30 %. В связи с этим произошедшее 30.01.2016 Жупановское землетрясение с  $M = 7.2$  рассматривается, как первое в возможной цепочке сильных землетрясений района северо-западной окраины Тихого океана.

Как было сказано в главе 1, пункт ПРТ находится в ЗДВ разлома, границы которой хорошо выделяются по геофизическим данным. Эта зона может рассматриваться как

флюидонасыщенный коллектор, являющийся местом разгрузки подземных водоносных горизонтов. По результатам сейсморазведочных работ в пункте ПРТ выделены 2 слоя с разными физико-литологическими свойствами: почвенно-пирокластический чехол  $h=1.8-2.7$  м и слой песчано-глинистых отложений аллювиального происхождения мощностью  $h=1.6-9$  м. Подложкой второго слоя является крупнообломочный материал с песчаным заполнителем аллювиально-флювиогляциального происхождения fQII-III. Основной поток  $R_n$  поступает в рыхлые отложения, которые имеют очень малое содержания радия, из более глубоких слоев за счет всплытия микропузырьков в зоне разгрузки подземных водоносных горизонтов.

Гидрологические особенности района пункта ПРТ дают основания полагать, что поток  $R_n$  к дневной поверхности формируется под действием напряженно-деформированного состояния блока геосреды большого объема, включающего большую часть Паратунского геотермального месторождения. По-видимому, длительные тренды ОА  $R_n$  связаны с длиннопериодными вариациями ППР в результате изменений регионального поля напряжений.

### 3.6. Выводы к главе 3

На основании данных, полученных на сети пунктов мониторинга ОА  $R_n$  на Петропавловск-Камчатском геодинамическом полигоне показано, что для районов гидротермальных систем распределение концентрации  $R_n$  с глубиной можно рассматривать как случай с сосредоточенными параметрами, когда перенос эманаций осуществляется через слой рыхлых отложений от обогащенного водоносного слоя минерализованных радоновых вод. Это подтверждается реакцией динамики ОА  $R_n$  в зонах аэрации и насыщения на баровариации и сезонный ход температуры воздуха в пунктах, расположенных в районе Паратунского геотермального месторождения.

В 1999–2015 гг. в Авачинском заливе, в периоды, когда работала сеть радонового мониторинга из двух и более пунктов, произошло 12 землетрясений с  $M > 5.5$  на глубинах до 90 км. Выявленный отклик в динамике подпочвенного радона на геодинамические процессы района Авачинского залива проявляется в виде аномалий ОА  $R_n$  на пунктах регистрации, имеющих бухтообразную форму или форму ступеньки. В случае возникновения аномалий до землетрясения их можно назвать предвестниковыми. Такие аномалии были обнаружены для 8 событий. При этом в случае роевых и форшок-афтершоковых последовательностей рассматривалось землетрясение с максимальной магнитудой. При таком подходе можно говорить о появлении предвестниковых аномалий для землетрясений с  $M = 5.5-6.9$  района Авачинского залива с вероятностью 0.67.

Возникновение этих аномалии может быть связано прохождением в земной среде сигналов типа уединенных деформационных волн, возникающих в результате квазипластичного течения геоматериала в сейсмофокальной зоне. Они воздействуют на эманурующий горизонт в пунктах регистрации, изменяя величину ОА Rn в зоне аэрации. Длительность таких волн по данным сети пунктов мониторинга подпочвенного Rn составляет от полутора до несколько десятков суток и время упреждения от 5 до 18 суток. Кажущаяся скорость распространения деформационных волн составляет 14–144 км/сутки [Фирстов и др., 2011, Фирстов и др. 2013]. В пользу предположения о формировании аномалий концентрации подпочвенного Rn в результате воздействия на эманурующий горизонт деформационных волн свидетельствуют азимуты на источники возмущений, рассчитанные по диапазону разности моментов прихода вступлений выделенных аномалий на пунктах регистрации, удовлетворительно совпадающие с направлениями на эпицентры землетрясений, а также наличие деформационного процесса, зарегистрированной наклономерной станцией, совпавшего по времени с аномалиями в поле подпочвенного Rn.

Следует отметить, что амплитуда аномальных возмущений в поле подпочвенного радона незначительна и по данным одного пункта регистрации, выделить ее проблематично, так как она маскируется высоким фоном помех из-за вариаций метеорологических величин (атмосферное давление, температура воздуха, влажность почвы).

По-видимому, на последней стадии подготовки землетрясений с  $M > 7$  следует ожидать более сильное проявление квазипластического течения геоматериала в зоне субдукции, что повышает вероятность прогноза землетрясений больших магнитуд с помощью мониторинга концентрации почвенных газов.

Подготовка глубокого Жупановского землетрясения с магнитудой 7.2 и глубиной очага 177 км, нашла отклик в динамике ОА Rn, молекулярного водорода и двуокиси углерода, что позволило дать заблаговременный краткосрочный прогноз, оправдавшийся по времени и магнитуде. Несмотря на большую глубину очага этого землетрясения, предвестниковые аномалии перед ним были зафиксированы по данным шести методов, позволяющих вести мониторинг некоторых параметров геофизических полей [Чебров и др., 2016]. Диапазон кажущейся скорости распространения деформационной волны для этого случая составил  $V_{КАЖ} = 250–270$  км/сутки, что значительно больше относительно землетрясений района Авачинского залива.

Выявленные аномалии в форме трендов и продолжительных бухт в динамике подпочвенного Rn являются откликом на геодинамические процессы Курило-Камчатского региона, связанные с подготовкой землетрясений с  $M > 7.5$  северо-западной окраины Тихого океана. Они обусловлены изменением потока Rn в районе пункта регистрации под действием длительных изменений напряженно-деформированного состояния блока геосреды большого объема.

## ГЛАВА 4. НЕКОТОРЫЕ ЗАКОНОМЕРНОСТИ РАДОНОВЫХ ПРЕДВЕСТНИКОВ ЗЕМЛЕТРЯСЕНИЙ

В главах 1 и 2 были даны определения для оцениваемых параметров каждой аномалии выделенной в данных радонового мониторинга на Петропавловск-Камчатском геодинамическом полигоне:

$$\delta\% = \left( \frac{(A_{\text{ан}} - A_{\text{фон}})}{A_{\text{фон}}} \right) \cdot 100$$

- относительная амплитуда аномалии;  $t_{\text{упр}}$  – время упреждения;  $t_{\text{ан}}$

– длительность аномалии.

При этом под временем упреждения понимается время между моментом возникновения предвестника и событием. В связи с ограниченной выборкой предвестниковых аномалий, в диссертации по времени упреждения была принята следующая градация: оперативные и краткосрочные предвестники имеют время упреждения  $t_{\text{упр}} \leq 10$  суток, среднесрочные  $10 < t_{\text{упр}} < 100$  суток, а долгосрочные  $t_{\text{упр}} > 100$  суток.

В работах [Chang, Lin, 1979; Зубков, 1981; Dubinchuk, 1991] выполнялся анализ различных радоновых предвестников с различными временами упреждения: долгосрочные (несколько лет), среднесрочные (около года), краткосрочные (2-6 месяцев), оперативные (часы-сутки). Исследователи обращали внимание на их временные формы и находили эмпирические зависимости между параметрами предвестниковых аномалий (амплитуда, время упреждения) и параметрами землетрясений (магнитуда, расстояние).

В работе [Dubinchuk, 1991] обращается внимание на особенности радоновых аномалий и сделана попытка объяснения их физической природы. В ней отмечается, что радоновые предвестники имеют большое многообразие форм различной длительности и регистрируются на значительных расстояниях от эпицентров, как мелких, так и глубоких землетрясений с диапазоном магнитуд  $M = 4-8$ . Автором [Dubinchuk, 1991] был сделан вывод, что наблюдаемые аномалии  $R_n$  могут возникать при небольших деформациях ( $10^{-6}-10^{-8}$ ), связанных с изменениями напряженно-деформированного состояния геосреды в пункте наблюдения.

Широкий материал для анализа радоновых предвестников был использован в работе [Cicerone et al., 2009]. В работе исследованы эмпирические зависимости между амплитудой предвестниковой аномалии от магнитуды землетрясения и расстоянием до очага землетрясения, а также зависимости длительности предвестниковой аномалии и времени упреждения от магнитуды.

#### 4.1. Зависимость параметров радоновых предвестников от магнитуды землетрясения и расстояния до эпицентра

Для изучения связей параметров предвестниковых аномалий с характеристиками землетрясений в диссертации использованы данные из работы [Cicerone et al., 2009] с добавлением предвестниковых аномалий, зарегистрированных на сети станций радонового мониторинга Петропавловск-Камчатского геодинамического полигона за период 1997–2015 гг.

Из сводки предвестников землетрясений в различных геофизических полях [Cicerone et al., 2009] выбраны 67 предвестников в поле радона, которые разбиты по длительности времени упреждения (таблица 4.1). Ссылки на источники для этой таблицы в списке литературы не указаны, они приведены в первоисточнике. Характеристики предвестников для 10 землетрясений, зарегистрированных на сети пунктов радонового мониторинга Петропавловск-Камчатского геодинамического полигона, приведены в хронологическом порядке. Рассматривались параметры предвестниковых аномалий:  $\delta\%$ ,  $t_{упр}$ ,  $t_{ан}$ .

Сеть пунктов мониторинга подпочвенного Rn на Петропавловск-Камчатском геодинамическом полигоне и эпицентры землетрясений, параметры предвестников для которых приведены в таблице 4.1, показана на рисунке 4.1 [Фирстов, 1999; Фирстов, Макаров, 2015].



Рисунок 4.1 – Сеть пунктов мониторинга концентрации подпочвенного радона и карта эпицентров землетрясений, имеющих радоновый предвестник (номера согласно таблице 4.1).

Таблица 4.1 – Предвестниковые аномалии в поле  $R_n$  из работы [Cicerone et al., 2009] и наблюдавшиеся на сети пунктов радонового мониторинга Петропавловск-Камчатского геодинамического полигона.

№	Дата	$\delta$ , %	$M$	$R$ , км	$t_{ан}$	$t_{урп}$	Страна, район	Источник <sup>2</sup>
<b>Краткосрочные</b>								
1	19/11/1978	-80	4.3	16	18	10	Исландия	Hauksson and Goddard, 1981
2	24/09/1977	44	2.9	21	1	5	США, South California	Shapiro et al., 1980
3	8/04/1985	100	5.6	300	10	7	США, Kettleman Hill	Teng and Sun, 1986
4	24/09/1977	62	2.9	21	3	5	США, Pasadena	Shapiro et al., 1980
5	13/10/1979	400	3.4	40	0.5	0.2	США, San Andreas, California	King, 1985
6	22/12/1979	800	3.3	20	1	0.5	США	King, 1985
7	1/05/1986	100	3.9	56	5	3	Франция, Ligurian Sea	Borchiellini et al., 1991
8	6/03/1984		7.9	1000	2	9	Япония, зона субдукции	Igarashi and Wakita, 1990
9	6/02/1987		6.7	130	4	3		
10	17/01/1995	1000	7.2	30	3	10	Япония, Kobe	Igarashi et al., 1995
11	7/03/1977	70	6	200	1	3	Китай, Chienan	Teng, 1980
12	27/07/1976	50	7.8	460	8	10	Китай, Tangshan	Shi and Cai, 1986
13	16/08/1976	100	7.2	350	1.5	10	Китай, Songpan	Jiang and Li, 1981
14	18/07/1981	н/д	5	37		4	Тайвань	Liu et al., 1985
15		180	7	330	7	3	Индия	Virk and Baljinder, 1994
16	9/04/1992	195	2.2	166		2	Индия, Himachal Pradesh	Virk and Baljinder, 1995
17	23/05/1995	165	2.7	105		3	Индия	
18	12/01/1993	153	4.4	440		9		
19	12/01/1993	183	4.4	440		9		
20	5/08/1993	242	3.7	325		10		
21	5/08/1993	227	3.7	325		10		
22	29/03/1999	22	6.8			2	Индия, Chamoli (groundwater)	Virk et al., 2001
23	29/03/1999	91	6.8			2	Индия, Chamoli (soil gas)	
24	1/06/1990	-5	6	200	2	2	Япония, Chiba-ken Toho-oki	Wakita et al., 1991

<sup>2</sup> Ссылки, взятые из работы [Cicerone et al., 2009], в списке литературы не приводятся.

Продолжение таблицы 4.1.

25	янв. 1987	-2	6.6	260			Япония, Fukushima	Igarashi et al., 1990
26	фев. 1987	-11	6.7	130				
27	апр. 1987	-9	6.6	110				
28	14/01/1978	15	7	25		5	Япония, Izu-Oshima-kinkai	Wakita et al., 1980
<b>Среднесрочные</b>								
29	3/07/1978	380	2.7	14	22	25	Исландия	Hauksson and Goddard, 1981
30	28/08/1978	60	3.4	5	17	30		
31	28/08/1978	280	3.4	21	17	27		
32	29/06/1979	40	1.9	9	19	25		
33	5/09/1979	40	2.8	8	17	20		
34	5/09/1979	100	2.8	5	33	33		
35	15/12/1979	100	4.1	56	50	50	Исландия, Tjornes Fracture Zone	Hauksson and Goddard, 1981
36	17/03/1976	120	4.3	25	60	25	США, San Andreas fault	King, 1978; King, 1980
37	19/01/1977	500	4	47	90	25		King, 1980
38	15/12/1977	400	4	45	15	30		
39	29/08/1978	200	4.2	75	240	90		
40	20/12/1977	40	2.8	12	10	24	США, South California	Shapiro et al., 1980
41	??/06/1979	375	3.9		33	60	США, Caruthersville Missouri	Steele, 1981
42	??/08/1981	504	4	40	150	60		Steele, 1984
43	??/06/1983	1000	3.7	13	3	15	США, Alandale, California	Shapiro et al., 1985
44	01/07/1979	72	4.8			60	США, Big Bear, California	Craig, 1980
45	14/02/1983	400	6.3	180		42	США, Sand Point, Alaska	Fleischer and Mogro-Campero, 1985
46	6/03/1987	н/д	6.9	367		50	Эквадор, Revantador	Flores Humanante et al., 1990
47		230		377		20		
48		400		339		35		
49		100		388		50		
50		100		183		40		
51		300		350		40		

Продолжение таблицы 4.1.

52	17/01/1995		200	7.2	30	90	75	Япония, Kobe	Igarashi et al., 1995
53	18/10/1980		н/д	5.8	39		19	Тайвань	Liu et al., 1985
54	14/05/1981		н/д	5.2	23		11		
55	21/06/1981		н/д	4.6	14		15		
56	31/10/1982		н/д	5.3	45		51		
57	??/11/1982		400	4.1	60		14		
58	20/10/1991		200	7	450	7	15	Индия, Uttarkashi	Virk and Baljinder, 1994
59			300	7	270	7	15	Индия	
60	21/07/1992		250	3.6	265		13	Индия	Virk and Baljinder, 1995
61	13/09/1984		+	6.2	65		14	Япония, Western Nagano prefecture	Ui et al., 1988
62	14/11/1994		600	7.1	48	7	22	Филиппины, Mindoro	Richon et al., 2003
<b>Долгосрочные</b>									
63	??/01/1982		-	4.5	160	365	365	США, Central Arkansas	Steele, 1984
64	30/06/1979		60	4.8	30	150	120	США, Big Bear, California	Chung, 1985
65	23/11/1980		25	6.5	220	150	150	Италия, Irpinia	Allegri et al., 1983
66	23/11/1980		170	6.5	200	180	180		
67	11/03/2011		125	9.0	490	244	137	Тохоку, Япония	Tsunomori et al., 2011
<b>Предвестники, зарегистрированные на Петропавловск-Камчатском полигоне</b>									
1	05/12/1997	ПРТ	370	7.7	400	10	28	Кроноцкое землетрясение	Фирстов, 1999
2	01/06/1998	ПРТ	20	6.9	136	85	85		Фирстов, Рудаков, 2003
3	08/03/1999	ПРТ	25	6.9	137	160	160		Фирстов, Рудаков, 2003; Фирстов, Макаров, Малышева, 2011
		ППН	20		170	15	12		
		ПРТ	-30		137	12	12		
4	15/03/2003	ПРТ	490	6.1	165	5	6		Фирстов, Макаров, Малышева, 2011
		ЛВЧ	320		200	4	5		
		ИНС	-75		150	4.5	6		
5	04/08/2004	ИНС	-18	5.6	106	3	12	Обе аномалии зафиксированы после 3-ния	
		ЛВЧ	-25		161				
		ИКР	20		115				

Окончание таблицы 4.1.

6	15/11/2006	ИНС 180	8.3	817	9	5	Симуширское землетрясение, Средние Курилы	Фирстов, 2015
		НЛЧ 67		830	13	12		
		ПРТ 60		800	900	1100		
7	30/07/2010	КРМ 17	6.3	172	8	18		Фирстов, Макаров, Малышева, 2011
		ПРТ 20		170	7	17		
		ИНС 51		158	12	18		
8	11/03/2011	ПРТ 500	9.0	2030	7	31	Землетрясение Тохоку, Япония	Макаров и др., 2012; Широков, Фирстов, Макаров и др., 2014
		ИНС 700		2060	12	27		
		КРМ 92		2015	4	42		
		ПРТ 83		2030	244	365		
9	15/10/2012	ПРТ 300	5.6	140	4	8		Фирстов, Макаров, Сероветников, 2013
		ИНС 18		140	4	8		
		КРМ 25		134	4	7		
		НЛЧ 35		134	4	6		
10	19/02/2015	ПРТ 20	5.5	55	4	7		Фирстов, Макаров и др. 2016

Примечание –  $\delta\% = \left( \frac{A_{ан} - A_{фон}}{A_{фон}} \right) \cdot 100$  – относительная амплитуда аномалии,  $M$  – магнитуда,  $R$  – эпицентрального расстояние,  $t_{ан}$  –

длительность аномалии в сутках,  $t_{упр}$  – время упреждения в сутках.

Теоретические и эмпирические зависимости параметров предвестников от магнитуды исследовались многими авторами, но в диссертации не рассматриваются все публикации, посвященные этому вопросу, а делается опора на две работы [Добровольский, 1991; Сидорин, 1992]. В работе [Добровольский, 1991] на основании теоретических выкладок, показано, что проявление предвестников подчиняется зависимости  $R=10^{0.43M}$ , которая близка к зависимости, полученной в работе [Сидорин, 1992] на основании эмпирических данных распространения относительных деформаций  $10^{-8}$  по закону  $R=10^{0.48M}$ .

Согласно [Сидорин, 1992] время упреждения, расстояние  $R$  от эпицентра до пункта регистрации и энергия землетрясения (в качестве которой в текущем разделе диссертации используется магнитуда по NEIC), могут быть координатами трехмерного пространства  $W$ , в котором предвестниковые аномалии могут быть описаны зависимостью  $Wn=\text{const}$ , где  $W=(\lg t_{\text{упр}}, \lg R, M)$ ,  $n$  – нормаль к соответствующей плоскости. Для практического применения эта зависимость может быть записана  $\lg t_{\text{упр}} R^m = aM - b$ , где  $m, a, b$  – постоянные коэффициенты. В результате обработки большого количества данных установлено, что  $m \approx 1$ .

Сравнение приведенных выше зависимостей с зависимостями, полученными для различных наборов предвестниковых радоновых аномалий, показано на рисунке 4.2.

Корреляционная зависимость  $\lg R = f(M)$  для всего набора предвестниковых аномалий в диапазоне  $2 < M < 9$  имеет вид (рисунок 4.2а):

$$\lg(R, \text{ км}) = 0.25M + 0.67 \quad (4.1)$$

Она значительно расходится с зависимостями, приведенными в работах [Добровольский, 1991; Сидорин, 1992]. Корреляционные зависимости для радоновых предвестниковых аномалий землетрясений с  $5 < M < 9$  (рисунок 4.2б):

$$\lg(R, \text{ км}) = 0.34M - 0.01, \quad (4.2)$$

и только предвестников, зарегистрированных на Петропавловск-Камчатском полигоне (рисунок 4.2в),

$$\lg(R, \text{ км}) = 0.36M - 0.04, \quad (4.3)$$

имеют близкий наклон, но лежат ниже зависимостей из работ [Добровольский, 1991; Сидорин, 1992].

Существенное расхождение зависимости (4.1) от зависимостей (4.2) и (4.3) связано с тем, что для  $M < 5$  предвестники обладают меньшей достоверностью; большинство их зарегистрированы в «ближней» зоне от эпицентра, где возможны другие законы формирования предвестниковых аномалий.

В работе [Сидорин, 1992] исследовалась зависимость  $\lg(t_{\text{упр}} \cdot R) = aM - b$ , которая уменьшает разброс эмпирических данных и лучше отображает связь между магнитудой и параметрами предвестников  $F_S = (M, R, t_{\text{упр}}) = 0$ .

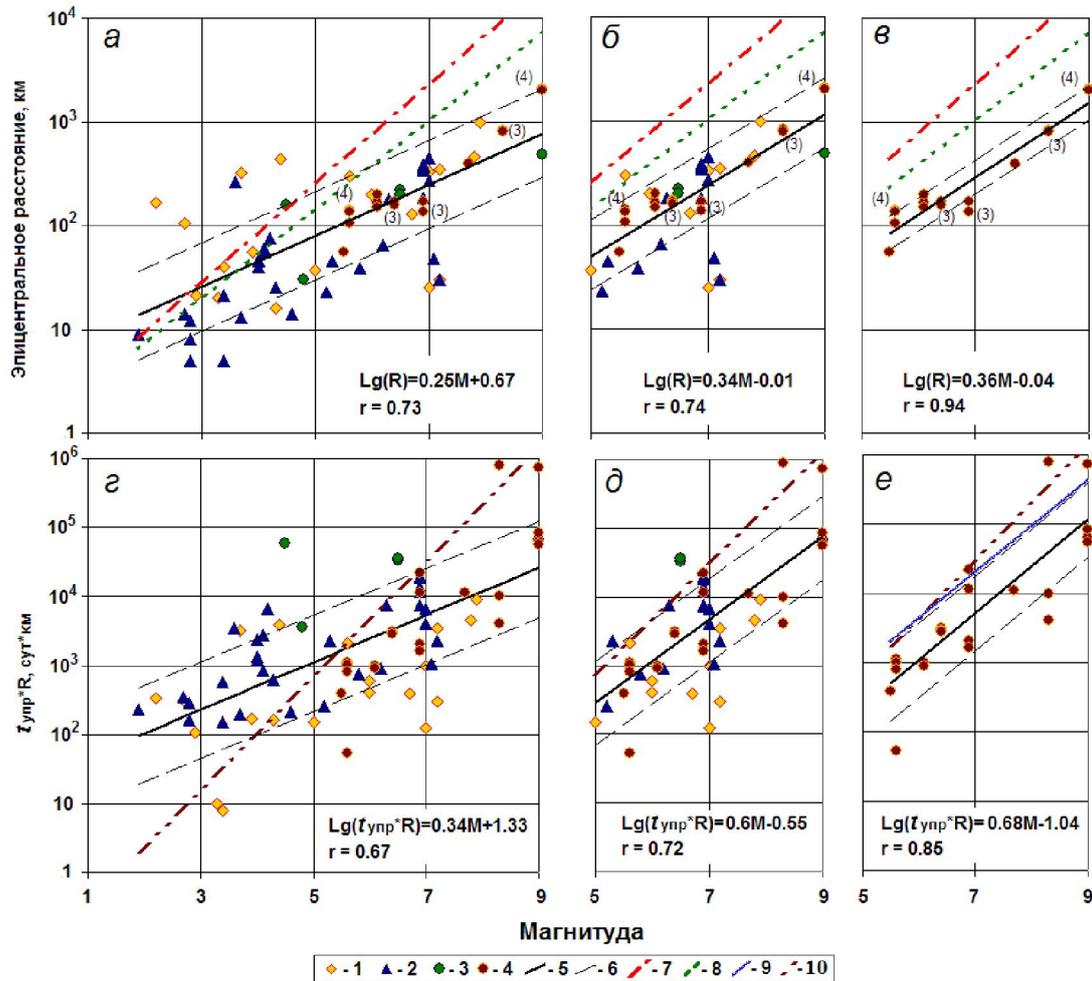


Рисунок 4.2 – Зависимость параметров предвестниковых аномалий от магнитуды землетрясения  $\lg R = f(M)$  и  $\lg(R \cdot t_{\text{упр}}) = f(M)$ : а, г - для всего массива данных, б, д – для диапазона  $M = 5-9$ , в, е – для предвестников, зарегистрированных на Петропавловск-Камчатском полигоне.

1 – оперативные и краткосрочные, 2 – среднесрочные, 3 – долгосрочные, 4 – камчатские предвестниковые аномалии; 5 – корреляционная зависимость для предвестников из таблицы 4.1; 6 – стандартная ошибка расчета корреляционной зависимости для предвестников из таблицы 4.1; 7 – корреляционная зависимость распространения относительных деформаций  $R = 10^{0.48M}$  [Сидорин, 1992]; 8 – теоретическая зависимость зоны распространения деформационных предвестников  $R = 10^{0.43M}$  [Добровольский, 1991]; 9 – корреляционная зависимость зоны проявления деформационных предвестников северо-западной части Тихоокеанского пояса [Сидорин, 1992]; 10 – корреляционная зависимость зоны проявления всех предвестников Тихоокеанского сейсмического пояса [Сидорин, 1992].

Для совокупности всех предвестников северо-западной части Тихоокеанского пояса была получена зависимость [Сидорин, 1992]:

$$\lg(t_{\text{тип}} \cdot R) = 0.82M - 1.26. \quad (4.4)$$

Для деформационных предвестников:

$$\lg(t_{\text{тип}} \cdot R) = 0.67M - 0.38. \quad (4.5)$$

Для всех трех наборов радоновых предвестниковых аномалий рассматривались аналогичные зависимости (рисунок 4.2г-е):

$$\lg(t_{\text{тип}} \cdot R) = 0.34M + 1.33, \quad (4.6)$$

$$\lg(t_{\text{тип}} \cdot R) = 0.60M - 0.55, \quad (4.7)$$

$$\lg(t_{\text{тип}} \cdot R) = 0.68M - 1.04. \quad (4.8)$$

Для последних двух наборов данных зависимости (4.7) и (4.8) близки к зависимости (4.5) из работы [Сидорин, 1992], что указывает на возможную деформационную природу радоновых предвестников. Это дает возможность, аналогично зависимости из работы [Сидорин, 1992]:

$$\lg R \varepsilon^{0.7} = 0.48M - 5.47, \quad (4.9)$$

где  $\varepsilon$  – относительная деформация, рассматривать зависимость относительной амплитуды  $\delta$  радонового предвестника, без учета отрицательных значений, от магнитуды (рисунок 4.3), которые для трех выборок могут быть записаны следующим образом:

$$\lg R \delta^{0.7} = 0.23M + 2.27, \quad (4.10)$$

$$\lg R \delta^{0.7} = 0.40M + 0.99, \quad (4.11)$$

$$\lg R \delta^{0.7} = 0.49M + 0.34. \quad (4.12)$$

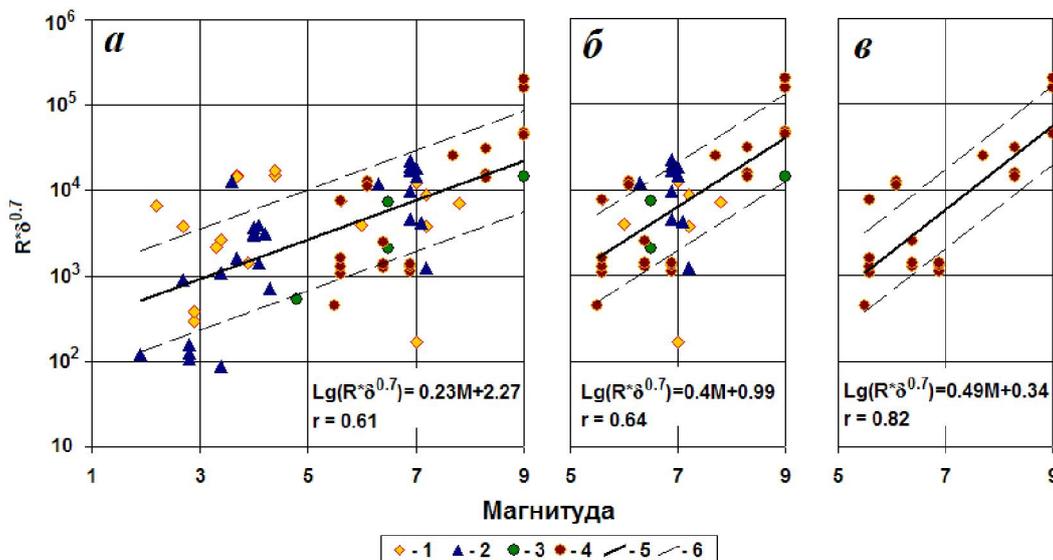


Рисунок 4.3 – Зависимость параметра предвестниковых аномалий  $\lg R \delta^{0.7}$  от магнитуды землетрясения: *a* – для всего массива данных, *б* – для диапазона  $M = 5-9$ , *в* – для предвестников, зарегистрированных на Петропавловск-Камчатском геодинамическом полигоне. Условные обозначения см. на рисунке 4.2.

Для полной выборки радоновых предвестников в диапазоне  $M = 2.5-9$  зависимость (4.10), значительно отличается от зависимости (4.9) для деформационных предвестников. Для выборок предвестников землетрясений с  $M = 5-9$  (4.11) и для предвестников, зарегистрированных на Петропавловск-Камчатском геодинамическом полигоне (4.12), наклоны зависимостей хорошо совпадают с зависимостью (4.9).

На рисунке 4.4а показано корреляционное поле зависимости  $\lg t_{\text{упр}} = f(\lg t_{\text{ан}})$  которая с коэффициентом корреляции  $r = 0.89$  может быть описана зависимостью:

$$\lg t_{\text{упр}} = 0.82 \lg t_{\text{ан}} + 0.31 \pm 0.3. \quad (4.13)$$

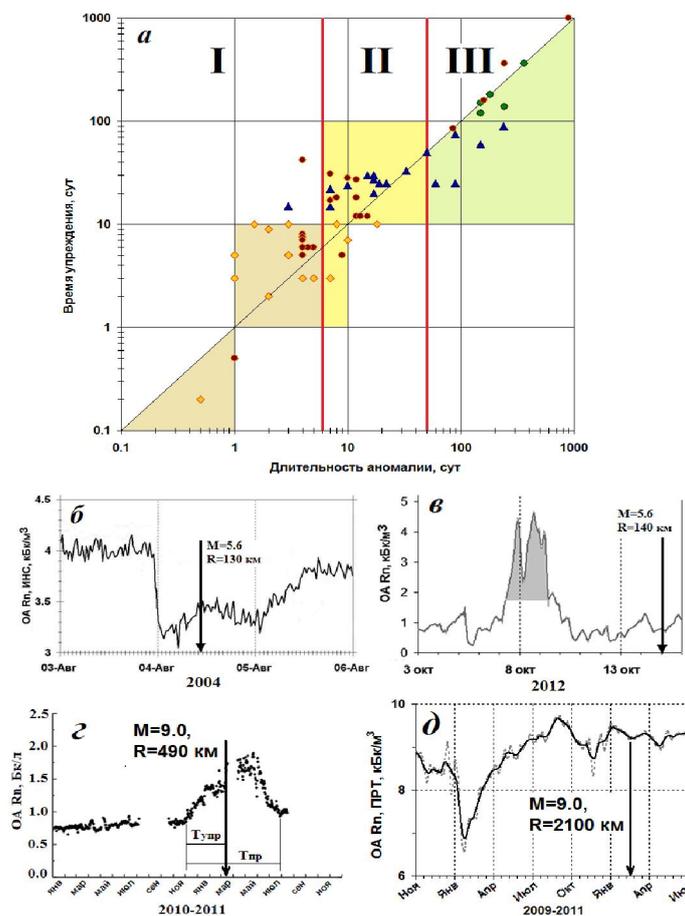


Рисунок 4.4 – Корреляционное поле логарифма времени упреждения радонового предвестника от логарифма его длительности и выделение отдельных областей в зависимости соотношения  $\lg t_{\text{упр}} \supset \lg t_{\text{ан}}$  (а):

I – область проявления импульсных и ступенчатых предвестников; II – область проявления квазибухтообразных предвестников; III – область проявления предвестников в виде тренда. Условные обозначения приведены на рисунке 4.2.

Примеры форм предвестниковых аномалий в ОА Rn: б – ступенька, в – квазибухтообразная аномалия, г, д – тренд.

С определенной долей условности на корреляционном поле по  $t_{ан}$  автором выделены три области (рисунок 4.4а). Для области с  $t_{ан} = 0.5–5$  суток из 16 случаев 12 имеют  $t_{ан} < t_{упр}$ . В этой области предвестниковые аномалии имеют формы *ступеньки или однополярного импульса* (рисунок 4.4б). *Квазибухтообразные* предвестники, имеющие в большинстве случаев  $t_{ан} < t_{упр}$ , характерны для области II ( $5 \leq t_{ан} < 50$  суток) (рисунок 4.4в). Для области III характерны длительные с  $t_{ан} > 50$  суток *тренды*, которые часто продолжаются и после события ( $t_{ан} > t_{упр}$ ) (рисунок 4.4г, д).

Большой временной интервал длительности радоновых предвестников ( $0.5 < t_{ан} < 1000$  суток) и различное соотношение  $\lg t_{упр} \supset \lg t_{ан}$  свидетельствует о существовании нескольких возможных механизмов генерации радоновых предвестников.

Для радоновых предвестников характерно многообразие форм различной длительности, и они регистрируются на значительных расстояниях от очагов землетрясений. Зависимость параметров предвестниковых аномалий в поле подпочвенного Rn от магнитуды землетрясения  $\lg R = f(M)$ ,  $\lg(R \cdot t_{упр}) = f(M)$ ,  $\lg R \delta^{0.7} = f(M)$  близки к подобным зависимостям для деформационных предвестников [Сидорин, 1992], что указывает на возможную связь радоновых предвестников с деформационными процессами. Непосредственно или опосредовано такие процессы могут оказывать влияние на миграцию Rn к дневной поверхности за счет интегрального эффекта в некотором объеме геосреды.

#### **4.2. Предвестниковые аномалии землетрясений в подпочвенном радоне, возникающие по механизму полного перемешивания**

Дочерними продуктами распада изотопов радия являются изотопы радона, которые распадаясь с испусканием  $\alpha$ -частиц, образуют изотопы полония. За счет энергии отдачи при радиоактивном распаде радия, радон покидает кристаллическую решетку и попадает в дефекты кристаллов и микротрещины. Затем, ввиду химической инертности, он относительно легко попадает в поровое пространство (в подземные воды, газовую компоненту), а после чего мигрирует к дневной поверхности и проникает в атмосферу. Поскольку наиболее долгоживущим из природных изотопов радона является  $^{222}\text{Rn}$  с периодом полураспада  $T=3.824$  суток, образующийся при альфа-распаде  $^{226}\text{Ra}$  уранового ряда ( $^{238}\text{U}$ ), то его содержание на дневной поверхности наиболее представительно.

С начала 40 годов прошлого века с целью отработки методики поиска месторождений урановых руд начал интенсивно изучаться процесс миграции Rn в верхней толще горных пород в зависимости от литологического состава приповерхностных отложений [Grammakov, 1936; Новиков, Капков, 1965; Граммаков и др., 1957]. В настоящее время интерес к этому вопросу связан с оценкой предельно допустимых концентраций Rn в нижних этажах жилых зданий и промышленных сооружений при их эксплуатации и проектировании [Микляев, Зиангиров, 2001; Яфасов и др., 2003; Смирнов, Герасимов 2006; Цапалов 2011]. В последние несколько десятков лет изучение механизма переноса Rn в грунтах обсуждается в связи с прогнозом сильных землетрясений и горных ударов в шахтах [Булашевич и др., 1996; Уткин, Юрков, 1997; Лящук и др., 2008; Фирстов, 1999; Яковлева, Каратаев, 2007; Фирстов, Макаров, Акбашев, 2015].

В классическом представлении миграция радона в поровом пространстве горных пород происходит благодаря двум основным механизмам транспорта – диффузионного и конвективного, на которые накладываются значительное количество факторов [Новиков, Капков, 1965]. Геологическая среда является неоднородно-слоистой, с заметно различающимися физико-литологическими характеристиками каждого слоя, что значительно усложняет процесс миграции Rn к поверхности. Вариации метеорологических величин (температура и влажность верхнего слоя грунта, атмосферное давление) весьма существенно влияют на миграцию радона и на его сток в атмосферу [Рудаков, 2009]. В меньшей степени на миграцию Rn влияют изменения напряженно-деформированного состояния геосреды. Возможность выделения аномалий в поле подпочвенного Rn, связанных именно с этим процессом, и является основанием рассматривать радоновый метод перспективным для прогноза землетрясений в районе полуострова Камчатка [Фирстов, Макаров, 2015].

Универсальной математической модели, которая бы полно описывала процесс переноса Rn в различных физико-литологических условиях, не существует. Хотя для частных случаев и при определенных допущениях разработано достаточно много моделей миграции Rn к поверхности [Гудзенко, Дубинчук, 1987; Бондаренко, Иванова, 1999; Паровик, 2014; Varhegyi et al, 1986; Dubinchuk, 1991; Etiope, Martinelli, 2002; Yakovleva, Parovik, 2010].

За время существования пунктов мониторинга подпочвенных газов были зарегистрированы три предвестниковые аномалии ПР (две в пункте ПРТ и одна в пункте ИНС), по морфологическим признакам относящихся к бухтообразным, но с определенной, общей для них, особенностью формы записи [Фирстов, Макаров, 2015; Фирстов, Макаров и др., 2016].

Эта особенность позволяет, в первом приближении, описать данные аномалии математической моделью распространения радона в потоке воды, разработанной в работах [Огильви, 1928; Гудзенко, Дубинчук, 1987].

Пункт ПРТ расположен в районе Паратунской геотермальной системы, которая располагается в районе одноименного грабена с мозаично-блоковой структурой верхнего яруса земной коры. Расположение газоразрядных счетчиков, данные с которых использованы в текущем разделе показаны на рисунке 4.5б (верхняя панель), а полное описание аппаратного комплекса пункта ПРТ дано в главе 2. На нижней панели рисунка 4.5б, приведена часть георадарного профиля длиной 120 м вблизи точек, где осуществляется регистрации Rn. В районе ПРТ\_2 выделяется разуплотненный участок, к которому, по данным эманационной съемки, также приурочена и повышенная ОА Rn в почвенном воздухе. Исходя из того, что в первых двух слоях содержание  $^{226}\text{Ra}$  не более 10 Бк/кг, то следует допустить, что регистрируемая ОА Rn на поверхности, обеспечивается  $^{226}\text{Ra}$  из пород с больших глубин.

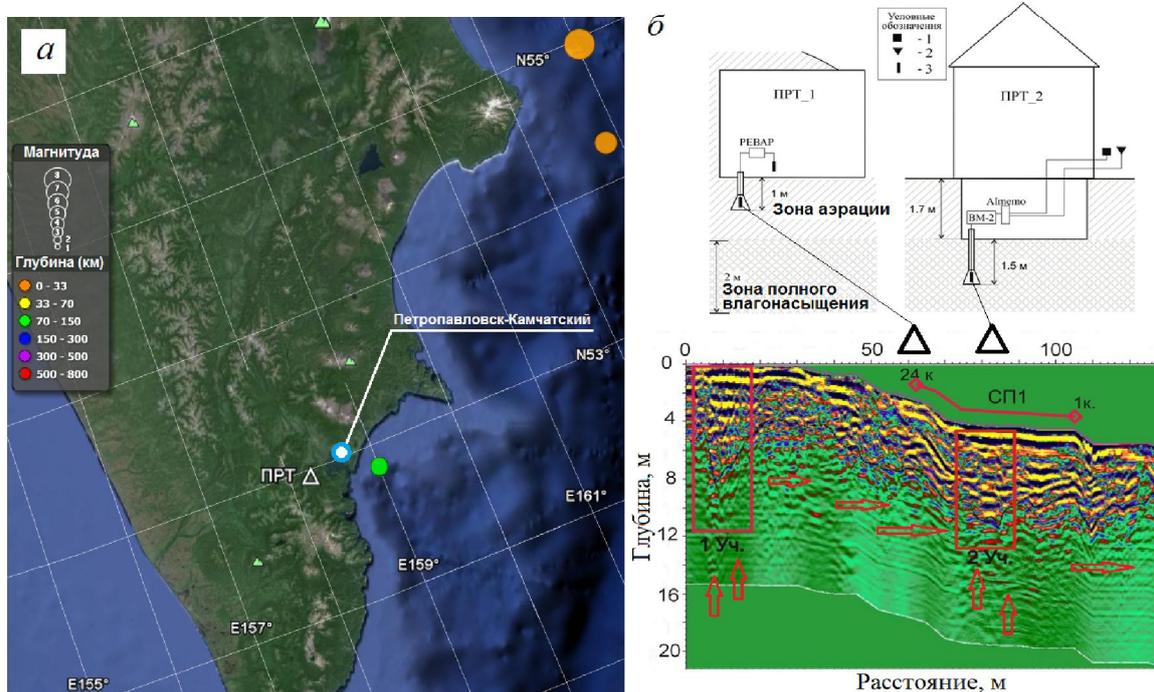


Рисунок 4.5 – Расположение пункта ПРТ на полуострове Камчатка и эпицентры Кроноцкого землетрясения 05 декабря 1997 г. с  $M=7.7$ , землетрясения в Авачинском заливе 19.02.2015 г. с  $M=5.5$  и землетрясения 20.03.2016 г. с  $M=6.4$  (а), схема расположения газоразрядных счетчиков и георадарный профиль района расположения пункта ПРТ (б). Красными стрелками показан водоток, квадратами выделены участки дизъюнктивных нарушений.

1 – датчик атмосферного давления, 2 – датчик температуры, 3 – газоразрядный счетчик [Фирстов, Макаров, 2015].

Зарегистрированные в зоне полного влагонасыщения точки ПРТ\_2 две аномалии имели специфическую форму (рисунок 4.6) [Фирстов, Макаров, 2015]. В начале становления работ по регистрации подпочвенного Rn на Петропавловск-Камчатском геодинимическом полигоне в пункте ПРТ перед Кроноцким землетрясением (КЗ) 5.12.1997 г. с  $M=7.7$  была зарегистрирована аномалия длительностью  $t_{ан} = 11$  суток с временем упреждения  $t_{упр} = 28$  суток и относительной амплитудой  $\delta \approx 250\%$ . В этот период регистрация ПР велась только в этой точке радиометром РГА-01 два раза в сутки.

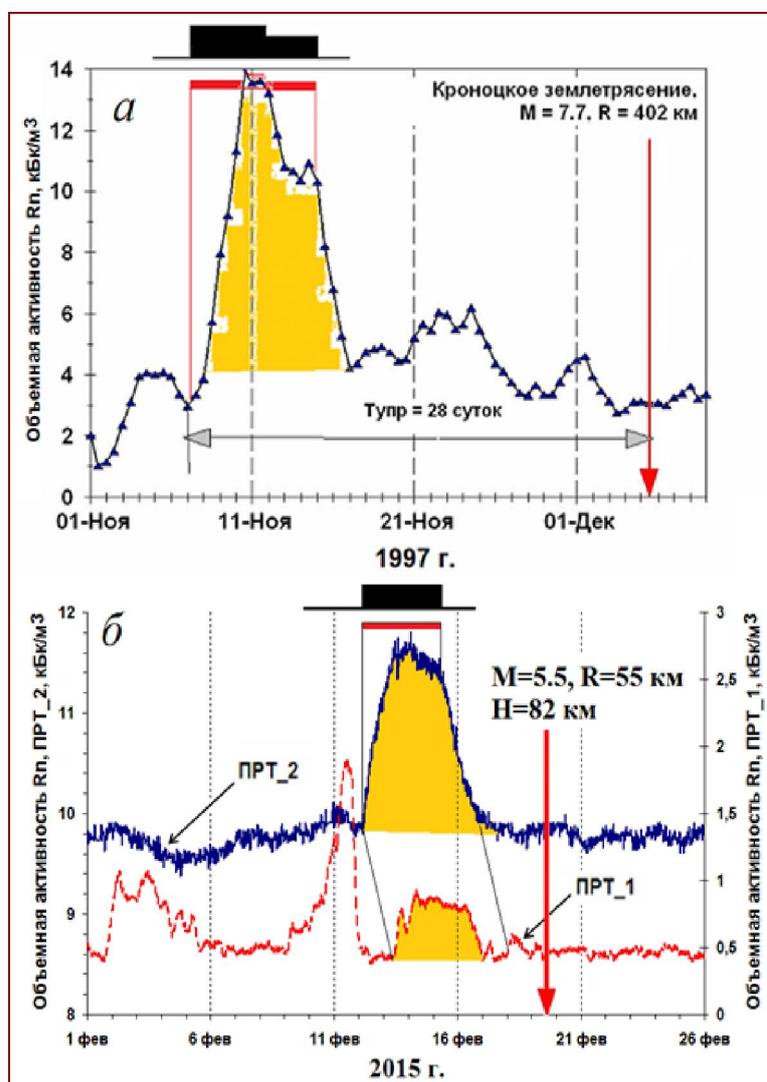


Рисунок 4.6 – Предвестниковые аномалии ОА Rn в пункте ПРТ перед Кроноцким землетрясением 5.12.1997 г. с  $M = 7.7$  на расстоянии 402 км (а) и перед землетрясением 19.02.2015 г. с  $M = 5.5$ , очаг которого располагался на глубине 82 км в 56 км от пункта ПРТ (б).

Перед землетрясением в Авачинском заливе (ЗАЗ) 19.02.2015 г. с  $M = 5.5$  предвестниковая аномалия с  $t_{ан} = 5$  суток и  $t_{упр} = 7$  суток и наблюдалась в двух точках пункта ПРТ: в зоне полного влагонасыщения (ПРТ\_2,  $\delta = 20\%$ ), и в зоне аэрации точки

расположенной в 23 м выше по склону на два метра (ПРТ\_1). В связи с тем, что в ПРТ\_1 слой аллювиально-делювиальных отложений имеет большую толщину по сравнению с ПРТ\_2, начало аномалии сдвинуто на 32 часа [Фирстов, Макаров, Акбашев, 2015]. Это дало возможность оценить скорость миграции радона к поверхности ( $v=1.7 \cdot 10^{-3}$  см/с) [Фирстов, Макаров и др., 2016].

Следует отметить, что в других пунктах мониторинга ПР, располагающихся на расстояниях  $\sim 40$  км от ПРТ аномалий выявлено не было. По-видимому, этот пункт обладает особой тензочувствительностью к процессам, связанным с подготовкой землетрясений.

После Жупановского землетрясения, подробно описанного в разделе 3.2, в акватории северной части Кроноцкого залива 20.03.2016 г. произошло более слабое землетрясение с  $M=6.4$ . Перед ним в динамике ОА Rn в пункте ИНС на двух каналах выделяется возмущение, зарегистрированное только на этом пункте и разделяющее два участка квазисинусоидальных колебаний с 5 по 19 февраля и с 23 февраля по 15 марта. Относительная амплитуда его составила на «поверхности»  $\delta = 100\%$ , а в зоне аэрации более 50% (рисунок 3.13в, рисунок 4.7).

Параметры трех указанных землетрясений по данным NEIC приведены в таблице 4.2.

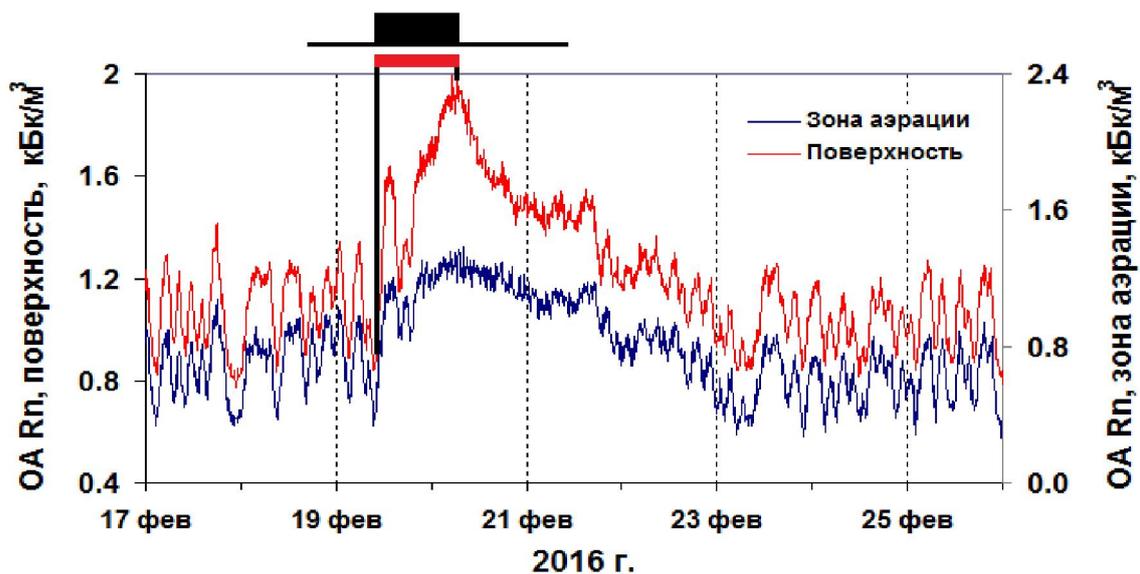


Рисунок 4.7 – Предвестниковая аномалия ОА Rn в пункте ИНС перед землетрясением 20.03.2016 г. с  $M=6.4$  на расстоянии 311 км.

Исходя из георадарного профиля для пункта ПРТ (рисунок 4.5б, нижняя панель) можно предположить, что в породах ниже уровня грунтовых вод, должна преобладать миграция растворенного Rn в потоке подземных вод – водная миграция. От поверхности

земли до уровня грунтовых вод, преобладает миграция Rn в газовой фазе в составе почвенного воздуха. По-видимому, миграция Rn в этих двух зонах происходит независимо. В зоне водной миграции преобладает горизонтальный перенос Rn, в то время как в области воздушной миграции, перемещение Rn происходит преимущественно в вертикальном направлении. Кроме того, под ПРТ\_2 выделяется разуплотненная зона, в районе которой установлен датчик, с помощью которого зарегистрированы аномалии. Здесь, можно предположить наличие вертикального водного потока с последующим стоком в ручей, расположенный в 50 м от точки ПРТ\_2 (рисунок 4.5б).

Таблица 4.2 – Основные параметры землетрясений и их предвестниковых аномалий, возникших по механизму полного перемешивания.

	$M$	$R$ , км	$H$ , км	$t_{ан}$ , сутки	$t_{упр}$ , сутки	$\delta\%$	$\Lambda$ , $c^{-1}$	Примечание
Кроноцкое землетрясение 5 декабря 1997 г.	7.7	402	33	11	28	250	0.03	Регистрация ОА Rn осуществлялась в ПРТ
Землетрясение 19 февраля 2015 г.	5.5	56	82	5	7	20	0.06	
Землетрясение 20 марта 2016 г.	6.4	311	30	4	30	100	0.04	Регистрация ОА Rn осуществлялась в ИНС

*Примечание –  $M$  – магнитуда,  $R$  – расстояние от пункта регистрации до эпицентра землетрясения,  $H$  – глубина очага землетрясения,  $t_{ан}$  – длительность аномалии,  $t_{упр}$  – время упреждения,  $\delta\%$  – относительная амплитуда аномалии,  $\Lambda$  – обобщенный кинетический параметр.*

В пункте ИНС по скоростным границам выделяются два слоя, почвенно-пирокластический чехол мощностью 1–3.3 м и переотложенные обвальнo-взрывные отложения, их мощность может составлять до 20–23 м, уровень грунтовых вод находится на 7–8 м.

Большое влияние на миграцию Rn, определяющее различия в отклике разных пунктов на подготовку сильных землетрясений, оказывают:

- зоны разуплотнений, выступающие в роли проводящих коллекторов для подпочвенных газов с больших глубин;
- наличие вертикальных, и горизонтальных неоднородностей верхнего слоя грунта;
- уровень грунтовых вод;
- расположение пунктов в различных структурных элементах побережья Авачинского залива.

Для описания и прогноза поведения Rn в грунтовых водах, а также для интерпретации данных изотопного опробования природных вод в 30-х годах прошлого

века была разработана физико-математическая модель переноса Rn в природной водной системе [Огильви, 1928], которая в дальнейшем была усовершенствована в работах [Гудзенко, Дубинчук, 1987; Dubinchuk, 1991].

В математической модели переноса радона в потоке водной среды [Гудзенко, Дубинчук, 1987] использовались следующие параметры:  $M$  и  $A$  – суммарное содержание и активность Rn на единицу объема  $V$  среды;  $C$ ,  $a$  – концентрация и удельная активность Rn в среде;  $Q = v \cdot S = [m^3 \cdot c^{-1}]$  – расход воды в системе. Эти параметры связаны следующими соотношениями:

$$M = C \cdot V, \quad A = \lambda_p \cdot M = \lambda_p \cdot C \cdot V = a \cdot V, \quad a = \lambda_p \cdot C, \quad (4.14)$$

где  $\lambda_p = 2.1 \cdot 10^{-6} \text{ c}^{-1}$  - константа радиоактивного распада Rn, связанная со средним временем жизни радона  $\tau_p = \lambda_p^{-1}$ .

В модели предполагается мгновенное полное поперечное перемешивание Rn и отсутствие перемешивания в продольном направлении, при этом скорость эманирования ( $q$ ) определяется следующим образом [Гудзенко, Дубинчук, 1987]:

$$q = \begin{cases} 0, & x < 0 \\ q_0 = \text{const}, & 0 \leq x \leq l^* \\ 0, & x > l^* \end{cases} \quad (4.15)$$

Для концентрации радона  $C = M/V$  с учётом того, что  $V = l \cdot S$  из уравнения (4.15) с нулевой начальной концентрацией, получаем следующую задачу:

$$\frac{dC(t)}{dt} = q - \lambda_p C(t), \quad C(0) = 0, \quad (4.16)$$

Таким образом, общее решение задачи с учетом (4.16) согласно [Гудзенко, Дубинчук, 1987], имеет вид:

$$C\left(t = \frac{x}{v}\right) = \begin{cases} 0, & x < 0, \\ C_\infty [1 - \exp(-\lambda_p t)], & 0 \leq x \leq l^*, \\ C_\infty [1 - \exp(-\lambda_p t^*)] [\exp(-\lambda_p (t - t^*))], & x > l^*, \end{cases} \quad (4.17)$$

здесь  $C_\infty = \frac{q_0}{\lambda_p}$ ,  $t = \frac{V_{\text{вод}}}{Q} = \tau_{\text{п}}(x)$  – время пребывания воды и Rn в системе на участке длиной  $x$ ;  $t^* = l^*/v = V_{\text{вод}}/Q = \tau_{\text{п}}^*$  – время пребывания воды и Rn в активной зоне;  $t - t^* = (x - l^*)/v = l/v = V_{\text{вод}}/Q = \tau_{\text{д}}$  – время движения воды и Rn до точки наблюдения, находящейся на расстоянии  $l$  от края активной зоны;  $V_{\text{вод}}(x) = xS\eta$  – объём воды в системе;  $V(x)$  – объём системы;  $\eta$  – пористость [Фирстов, Макаров, 2015; Паскаръ, Паровик, 2015].

На последней стадии подготовки землетрясений структурная неоднородность геосреды приводит к возникновению концентрации напряжений сжатия или растяжения в

разломных зонах. Если наблюдения проводятся в районе развитой гидрогеологической системы, то ее общая реакция на деформационное воздействие пропорциональна интегральной сумме пространственно-временных вариаций деформационного поля.

В гомогенных твердых телах кинетика диффузии Rn, наряду с ядерной отдачей, представляет наиболее значимый физический процесс его поступления в жидкую или газообразную фазу пород. Процесс выделения Rn из минерала является двухстадийным. На первом этапе объемная диффузия определяет миграцию атомов к дефектам, которые являются ловушками. Далее ловушки-дефекты, мигрируя, переносят накопленные в них газы и другие компоненты. Энергия активации выхода атома Rn из такой ловушки может оказаться больше энергии активации процесса миграции ловушки. В таких условиях для возникновения миграции необходимо наличие достаточного количества дефектов в минералах [Гудзенко, Дубинчук, 1987]. Дефекты в твердых телах присутствуют всегда, но кроме этого при пространственно-временных вариациях деформационного поля их количество может меняться. Так же может изменяться количество и объем магистральных (более крупных) пор и капилляров. В работе [Регель и др., 1976] показано, что перенос благородных газов с дефектами может активироваться не только повышением температуры, но и механического напряжения. Результатом изменения деформационного поля твердых пород и активации переноса Rn в минералах становится формирование радоновых аномалий в почвенном воздухе и в газах, растворенных в подземных водах. Тогда общее решение задачи сводится к поиску зависимости приращения концентрации Rn от времени [Dubinchuk, 1991]:

$$\begin{aligned} \Delta C(t) &= 0, t \leq 0 \\ \Delta C(t) &= \Delta C_{\max} (1 - e^{-\Lambda t}), 0 < t < t_s \\ \Delta C(t) &= \Delta C_{\max} (1 - e^{-\Lambda t_s}) e^{-\Lambda(t-t_s)}, t \geq t_s \end{aligned} \quad (4.18)$$

где  $\Lambda = \lambda_a + \lambda_w + \lambda_p$  – обобщенный кинетический параметр системы;  $\lambda_a$  – постоянная, характеризующая абсорбцию на стенках капилляров;  $\lambda_w = Q/V$  – постоянная, характеризующая пропускную способность гидрохимической системы,  $Q$  – расход потока в системе,  $V$  – водообменный объем системы;  $\lambda_p$  – постоянная распада Rn.

Согласно таким представлениям, в работе [Dubinchuk, 1991] рассчитан отклик концентрации Rn и других газов в гидрогеологической системе на различные виды деформационного воздействия: единичный импульс – дельта-функция Дирака; продолжительное постоянное воздействие с резким фронтом роста напряжения; линейно увеличивающееся напряжение с резкой ступенькой в конце (рисунок 4.8а,б,в). Кривые построены с учетом различного среднего времени  $\tau$  пребывания Rn в поровом флюиде:  $\tau_1 \leq \tau_2 \leq \tau_3 \leq \tau_4$ .

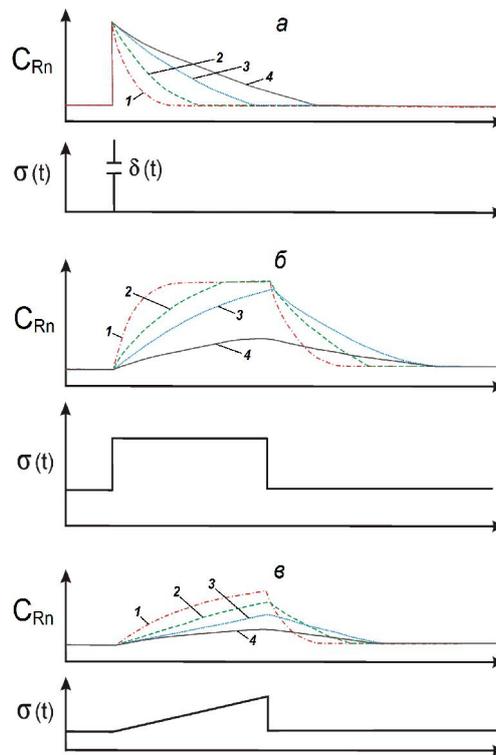


Рисунок 4.8 – Отклик радонового предвестника в гидрогеологической системе с режимом полного перемешивания на различный вид механического воздействия на геосреду:

*a* – единичный импульс напряжения (Дельта-функция Дирака); *б* – постоянный импульс напряжения; *в* – линейно увеличивающийся импульс напряжения.

Кривые пронумерованы по времени  $\tau$  пребывания Rn в поровом флюиде:  $\tau_1 \leq \tau_2 \leq \tau_3 \leq \tau_4$  [Dubinchuk, 1991].

Хотя вертикальное движение подземных вод по дизъюнктивным зонам, в отличие от горизонтального случая, полностью не может удовлетворять условиям модели, но можно сделать попытку на качественном уровне применить рассмотренную модель к зарегистрированным аномалиям.

Если исходить из формы зарегистрированных аномалий и теоретических кривых, то время действия прямоугольного импульса напряжений можно принять в первом случае 8, во втором 3 суток, а в третьем около 1 суток (черные прямоугольники, на рисунках 4.6, 4.7). В первом случае можно предположить, что импульс напряжения состоял из двух частей, но для упрощения задачи рассматривался равномерный прямоугольный импульс с максимальной амплитудой.

Тогда оценку обобщенного кинетического параметра системы можно сделать методом подбора наилучшего совпадения расчетной и экспериментальной кривых. Исходя из этих условий, рассчитан теоретический отклик и проведено сравнение формы

теоретических и экспериментальных кривых  $\Delta C$  нормированных на максимум. Наилучшее совпадение кривых для Кроноцкого землетрясения наблюдается при  $\Lambda = 0.03 \text{ с}^{-1}$ , для землетрясения Авачинского залива при  $\Lambda = 0.06 \text{ с}^{-1}$ , а для землетрясения 20.03.2016 г. при  $\Lambda = 0.04 \text{ с}^{-1}$  (рисунок 4.9, 4.10). Если пренебречь постоянной, характеризующей абсорбцию на стенках капилляров  $\lambda_a$  и учесть что постоянная распада радона  $\lambda_p = 2.1 \cdot 10^{-6} \text{ с}^{-1}$ , то сравнительно большие значения  $\Lambda$  можно отнести только за счет изменения пропускной способности всей гидрогеологической системы района пункта регистрации, возникающего на последней стадии подготовки землетрясения.

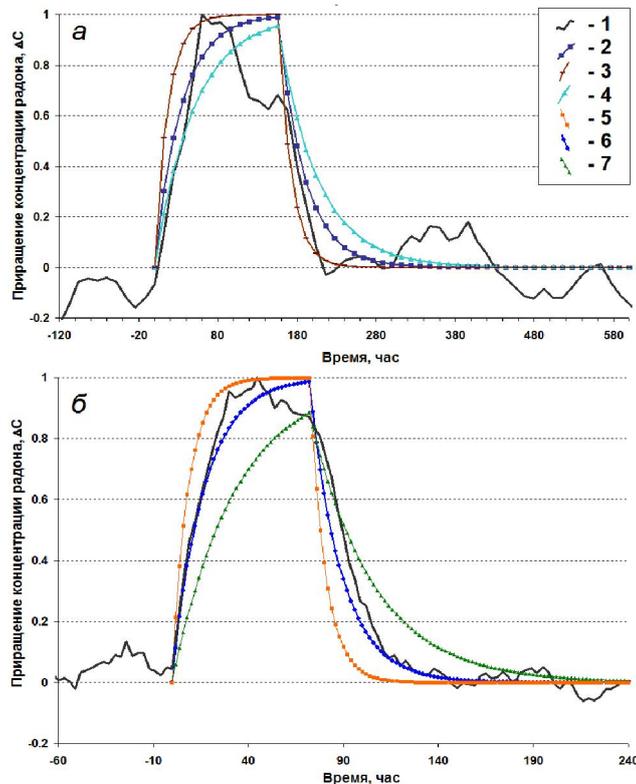


Рисунок 4.9 – Кривые теоретического отклика (2-7), иллюстрирующие приращение концентрации Rn при различных значениях обобщающего кинетического параметра ( $\Lambda$ ) и экспериментальные кривые предвестниковых аномалий концентрации Rn, нормированные на максимум: *а* – Кроноцкое землетрясение 5 декабря 1997 г. с  $M = 7.7$ , *б* – землетрясение Авачинского залива 19 февраля 2015 г. с  $M = 5.5$ .

1 – экспериментальные кривые; 2 –  $\Lambda = 0.03$ ; 3 –  $\Lambda = 0.06$ ; 4 –  $\Lambda = 0.02$ ; 5 –  $\Lambda = 0.12$ ; 6 –  $\Lambda = 0.06$ ; 7 –  $\Lambda = 0.03 \text{ [с}^{-1}\text{]}$ .

Соотношение параметров предвестниковых аномалий достаточно хорошо удовлетворяют соотношению энергий рассмотренных землетрясений. Несмотря на большое расстояние пункта регистрации от эпицентра Кроноцкого землетрясения с  $M = 7.7$  для него  $\delta = 250\%$  против 20% для более слабого землетрясения с  $M = 5.5$ . В тоже

время  $\Lambda_{\text{КР}}/\Lambda_{\text{ЗАЗ}} = 0.5$ , т.е. пропускная способность системы при формировании аномалии Кроноцкого землетрясения оказалась в 2 раза меньше чем при формировании предвестника для землетрясения Авачинского залива. Это указывает на то, что в первом случае аномалию формировали воды, поднявшиеся с больших глубин, что вполне логично для энергетических соотношений рассмотренных событий.

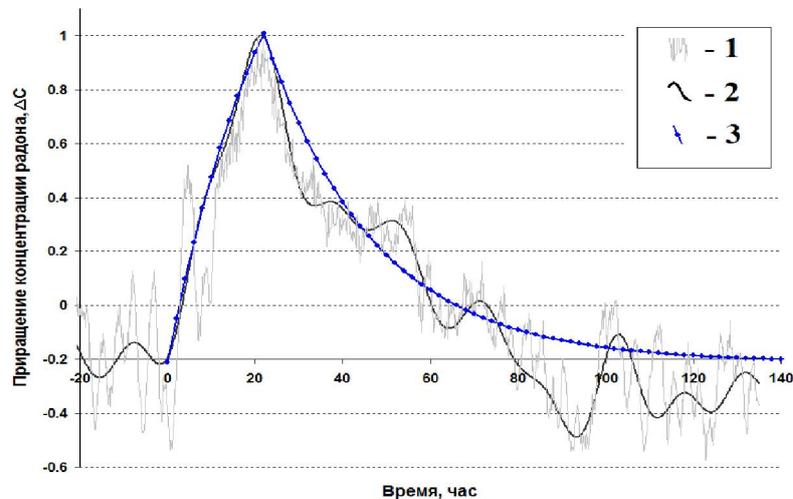


Рисунок 4.10 – Кривая теоретического отклика (3), иллюстрирующая приращение концентрации радона при  $\Lambda = 0.04 \text{ с}^{-1}$ , экспериментальная кривая (1), экспериментальная кривая после фильтрации (2). Кривые нормированы на максимум.

Соотношение  $\Lambda_{\text{ЗАЗ}}/\Lambda_{\text{2016}}=1.5$ , т.е. в рассмотренном случае можно предполагать, что пропускная способность системы при формировании аномалии перед ЗАЗ была больше на 50%, чем перед землетрясением 20.03.2016 г.

С некоторой долей условности подобное поведение гидрогеологической системы можно объяснить, опираясь на бифокальную модель подготовки землетрясения, предложенную в работе [Николаевский, Собисевич, 2015]. В бифокальной схеме очага землетрясения рассматривается идея о разделении очага на зоны дилатансии и компакци/накопления упругой энергии за счет вытеснения избыточного материала (с последующей упругой отдачей), чем и объясняется форшоковый процесс. Причем показано, что аномалии в поле  $R_n$  могут возникать на стадии подготовки землетрясения вследствие «перехлеста», возникающего после спада давления за счет дилатансии, когда его уровень начинает превышать уровень, определяемый тектоническим нагружением. По-видимому, к этому периоду за счет увеличения водного потока с больших глубин, и приурочены обнаруженные аномалии.

При этом точка в зоне полного влагонасыщения пункта ПРТ достаточно слабо реагирует на вариации метеорологических величин [Фирстов, Рудаков, 2003] и вследствие расположения пункта в ЗДВ разлома является весьма тензочувствительной. Именно по

данным этой точки прослежены особенности динамики подпочвенного радона за 15 летний период [Фирстов, Макаров, 2015].

#### 4.3. Выводы к главе 4

Для радоновых предвестников характерно разнообразие форм, различная длительность, и регистрация на значительных расстояниях от очагов землетрясений. Корреляционные зависимости, исследованные в главе 4, для радоновых предвестниковых аномалий, зарегистрированных на Петропавловск-Камчатском полигоне, имеют близкий наклон с зависимостями для совокупности всех предвестников северо-западной части Тихоокеанского пояса и для деформационных предвестников для диапазона магнитуд  $5 < M < 9$ . Это указывает на возможную связь радоновых предвестников с деформационными процессами. На основании полученных корреляционных зависимостей сделан вывод о существовании нескольких возможных моделей генерации радоновых предвестников.

Существует достаточно много моделей миграции  $Rn$  к поверхности, разработанных с определенными допущениями для ряда случаев известных физико-литологических условий. В поле подпочвенного  $Rn$  на Петропавловск-Камчатском геодинамическом полигоне кроме аномалий, связанных с воздействием возмущений типа уединенных деформационных волн на эманлирующий горизонт зарегистрированы три аномалии в ОА  $Rn$ , по форме записи позволяющие рассматривать их механизм возникновения по модели переноса  $Rn$  в водной среде с полным поперечным перемешиванием. Их появление связано с общей реакцией гидрогеологической системы в районе расположения пунктов регистрации на деформационное воздействие, пропорционально интегральной сумме пространственно-временных вариаций деформационного поля.

Выполнено математическое моделирование кривых приращения  $Rn$  в потоке воды вследствие воздействия прямоугольного импульса напряжений и получено удовлетворительное совпадение теоретических и экспериментальных кривых. Сделан вывод, что изменения пропускной способности гидрогеологической системы отдельного блока геосреды в районе пункта регистрации, возникающие на последней стадии подготовки землетрясения, приводят к появлению аномалий такого типа.

## ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Для радоновых предвестников характерна различная длительность и многообразие их форм. Они могут проявляться на значительных расстояниях от эпицентров землетрясений. Литературные данные с большой достоверностью дают основание для поиска в динамике подпочвенного Rn предвестниковых аномалий для землетрясений с большим диапазоном магнитуд.

Одним из наиболее важных результатов настоящей работы является разработка методики регистрации подпочвенных газов на сети пунктов. На основании данных регистрации концентрации подпочвенных газов и большого накопленного опыта возможно выделение предвестниковых аномалий в поле подпочвенного газа, расчет азимутов на предполагаемые источники возмущений и определение диапазонов кажущихся скоростей их распространения. Сеть пунктов мониторинга концентрации подпочвенных газов на Петропавловск-Камчатском геодинамическом полигоне работает в течение почти 20 лет. В настоящее время она оснащена современными аппаратно-программными средствами и методами для сбора, обработки и хранения получаемых временных рядов с передачей данных в режиме, близком к реальному времени. Все пункты сети оснащены аппаратными комплексами для регистрации концентрации подпочвенных газов, разработанными и созданными при участии автора. В диссертации рассмотрены особенности выбора пунктов регистрации, строение верхней части геологического разреза в них. Представлены созданные и внедренные с участием диссертанта оригинальные методы и программные средства для сбора, обработки и хранения временных рядов концентрации подпочвенных газов и метеорологических величин, получаемых на сети пунктов.

Приведено описание и данные апробации разработанного способа оценки плотности потока радона с поверхности при его пассивной регистрации в накопительной камере для оперативного определения чувствительности конкретной точки наблюдений, отличающегося простотой и оперативностью.

Результаты выполненных работ по исследованию связи динамики подпочвенного Rn с сейсмичностью южной Камчатки показали, что из 12 землетрясений района Авачинского залива с  $M > 5.5$  и глубиной очага менее 90 км, произошедших в 1999-2016 гг., восемь имели предваряющие аномалии в поле подпочвенного Rn. В четырех случаях обнаружено, что между временами появления аномалий на 3-5 пунктах имеются

характерные относительные сдвиги. Экспериментальные данные указывают на возможную причину появления синфазных аномалий на сети пунктов подпочвенного радона, связанную с прохождением по земной среде сигналов типа уединенных деформационных волн. Подобные волны могли бы предположительно возникать за счет квазивязкого течения геоматериала на последней стадии подготовки землетрясения в области готовящегося очага, и воздействовать на эманулирующий горизонт в пунктах регистрации, изменяя величину  $OA Rn$  в зоне аэрации. Регистрируемые аномальные изменения  $OA Rn$ , в некоторых случаях, являются предвестниковыми аномалиями землетрясений. Основанием для такого вывода служат рассчитанные для четырех случаев азимуты подхода аномалий на пункты регистрации, удовлетворительно совпадающие с направлениями на эпицентры землетрясений, а также наличие в одном случае деформации земной поверхности, зарегистрированной наклономерной станцией и совпавшей по времени с аномалиями в поле  $Rn$ . Длительность уединенных деформационных волн по данным сети пунктов мониторинга подпочвенного  $Rn$  составляет от полутора до нескольких десятков суток и время упреждения от 0.5 до 80 суток. Кажущаяся скорость их распространения составляет 14–144 км/сутки. Так же обнаружены краткосрочные, от полутора до сорока суток, удаленные предвестники в динамике подпочвенного радона перед двумя Курило-Камчатскими землетрясениями: Симуширским землетрясением с  $M=8.3$ ; землетрясением Тохоку с  $M=9.0$ .

Впервые в мировой практике радоновых исследований на основании оперативно зарегистрированных предваряющих аномалий в поле подпочвенного радона, а так же в концентрациях молекулярного водорода и двуокиси углерода был дан оправдавшийся по времени и магнитуде заблаговременный краткосрочный прогноз глубокого землетрясения с  $M = 7.2$  и  $H = 177$  км. В диссертации приведены данные о зарегистрированных перед этим землетрясением, имеющим название Жупановского и произошедшим 30 января 2016 г., бухтообразных отрицательных возмущения  $OA Rn$ , а также положительном возмущении в концентрации  $H_2$ . Отрицательные аномалии землетрясений в поле подпочвенного радона отмечаются крайне редко, что характеризует этот случай как уникальный. Диапазон кажущейся скорости распространения деформационной волны для этого случая составил  $v_{КАЖ} = 250–270$  км/сутки, что значительно больше относительно землетрясений района Авачинского залива.

На основании почти двадцатилетних наблюдений выявлены предваряющие аномалии длительностью от одного года до трех лет в виде повышения (в форме тренда) и последующего бухтообразного снижения концентрации подпочвенного  $Rn$  перед некоторыми землетрясениями с  $M > 7.5$  северо-западной окраины Тихого океана и сделан

вывод возможном механизме их генерации, обусловленном изменением потока  $R_n$  в районе пункта регистрации под действием длительных изменений напряженно-деформированного состояния блока геосреды большого объема.

В диссертации рассмотрены особенности и некоторые закономерности возникновения радоновых предвестников землетрясений на Камчатке в сопоставлении с известными литературными данными. Линии регрессии в билогарифмическом масштабе в зависимостях параметров зарегистрированных радоновых предвестниковых аномалий от магнитуды в диапазоне  $5 < M < 9$  имеют наклон близкий к наклону зависимостей совокупности всех предвестников северо-западной части Тихоокеанского пояса, а также для деформационных предвестников. Это указывает на возможную деформационную природу радоновых предвестников. С учетом морфологических признаков и диапазона длительности аномалий сделан вывод о существовании нескольких возможных моделей их возникновения.

Из литературных источников известно достаточно много моделей миграции  $R_n$  к поверхности, разработанных с определенными допущениями для известных физико-литологических условий. В поле подпочвенного  $R_n$  на Петропавловск-Камчатском геодинамическом полигоне регистрировались аномалии ОА  $R_n$ , по форме записи позволяющие рассматривать их механизм возникновения с использованием теоретической модели переноса  $R_n$  в водной среде с полным поперечным перемешиванием. На основании этой модели выполнено математическое моделирование кривых приращения  $R_n$  в потоке воды вследствие воздействия прямоугольного импульса напряжений и получено удовлетворительное совпадение теоретических и экспериментальных кривых. Сделан вывод, что изменения пропускной способности гидрогеологической системы отдельного блока геосреды в районе пункта регистрации, возникающие на последней стадии подготовки землетрясения, приводят к появлению аномалий такого типа.

**СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ**

1. Абдувалиев, А.К. Радоновый предвестник некоторых сильных землетрясений Средней Азии / А.К. Абдувалиев, Г.И. Войтов, В.П. Рудаков // ДАН СССР. – 1986. – Т. 291, № 4. – С. 924-927.
2. Аникин, О.П. Методические рекомендации по определению состава, состояния и свойств грунтов сейсмоакустическими методами / О.П. Аникин, Ю.В. Горшенин. – М.: НИИ Транспорт. стр-ва, 1985. – 37 с.
3. Барсуков, В.Л. Значение гидрогеохимических методов для краткосрочного прогноза землетрясений / В.Л. Барсуков, Г.М. Варшал, А.В. Гаранин, Н.С. Замокина // Гидрогеохимические предвестники землетрясений. – М.: Наука, 1985. – С. 3-16.
4. Баранов, В.И. Радиометрия / В.И. Баранов. – Изд-во АН СССР, 1956. – 230 с.
5. Бокс, Дж. Анализ временных рядов. Прогноз и управление / Дж. Бокс, Г. Дженкинс. – М.: Мир, 1974. – 406 с.
6. Бондаренко, В.М. Перенос радона в горном массиве: модели и экспериментальные данные. Статья I / В.М. Бондаренко, Т.М. Иванова // Изв. вузов. Геология и разведка. – 1999. – № 4. – С. 96-107.
7. Бондаренко, В.М. Перенос радона в горном массиве: модели и экспериментальные данные. Статья II / В.М. Бондаренко, Н. В. Демин, Т. М. Иванова // Изв. выс. уч. зав. Геология и разведка. – 1999. – № 5. – С. 108-115.
8. Булашевич, Ю.П. Изменение концентрации радона как предвестник горных ударов в глубоких шахтах / Ю.П. Булашевич, В.И. Уткин, А.К. Юрков, В.В. Николаев // Горный журнал. – 1996. – № 6. – С. 19-22.
9. Булашевич, З.П. Диффузия эманации в пористых средах / З.П. Булашевич, Р.К. Хайритдинов // Изв. АН СССР. Серия Геофизика. – 1959. – № 12. – С. 1787-1792.
10. Быков, В.Г. Деформационные волны Земли: концепция, наблюдения и модели / В.Г. Быков // Геология и геофизика. – 2005. – Т. 46 (11). – С. 1176-1190.
11. Быковский, Ю.А. Высокостабильный водородный сенсор на основе МДП-структуры / Ю.А. Быковский, В.П. Козленков, И.Н. Николаев, Ю.А. Уточкин. – М.: Метрология, 1991. – 30 с.

12. Владов, М.Л. Введение в георадиолокацию. / М.Л. Владов, А.В. Старовойтов. – М.: МГУ, 2005. – 153 с.
13. Глухов, Ю.А. Разработка регистрирующей схемы для газоразрядных счетчиков / Ю.А. Глухов, А.В. Васильев, Д.И. Лукоянов, Д.Д. Липовский, В.М. Федосеев // Аппаратура и новости радиационных измерений. – 2009. – № 4 (60). – С.33-36.
14. Горбушина, Л.В. К вопросу о механизме образования радиогидрогеологических аномалий в сейсмоактивном районе и их значение при прогнозировании землетрясений / Л.В. Горбушина, В.Г. Тыминский, А.И. Спиридонов // Советская геология. – 1972. – № 1. – С. 153-156.
15. Граммаков, А.Г. Эманационный (радоновый) метод поисков, исследования и разведки радиоактивных объектов / А.Г. Граммаков. – Тр. ЦНИГРИ, 1934. – Вып. 7. – 115 с.
16. Граммаков, А.Г. Радиометрические методы поисков и разведки урановых руд / А.Г. Граммаков, А.И. Никонов, Г.П. Тарфеев. – М.: Госгеолтехиздат, 1957. – 610 с.
17. Гудзенко, В.В. Изотопы радия и радон в природных водах / В.В. Гудзенко, В.Т. Дубинчук. – М.: Наука, 1987. – 45 с.
18. Дещеревский, А.В. Технологии анализа геофизических рядов. Часть 1. Требования к программе обработки / А.В. Дещеревский, В.И. Журавлев, А.Н. Никольский, А.Я. Сидорин // Сейсмические приборы. – 2016. – Т. 52, № 1. – С. 61-82.
19. Добровольский, И.П. Теория подготовки тектонического землетрясения / И.П. Добровольский. – М.: ИФЗ АН СССР, 1991. – 224 с.
20. Ефимов, В.А. Применение электростатического флюксметра ЭФ-4 для исследований геодинамических процессов / В.А. Ефимов, Д.М. Орешкин, П.П. Фирстов, Р.Р. Акбашев // Сейсмические приборы. – 2013. – Т. 49, № 4. – С. 35-46.
21. Зубков С.И. Радоновые предвестники землетрясений / С.И. Зубков // Вулканология и сейсмология. – 1981. – № 6. – С. 74-105.
22. Копылова, Г.Н. Информационная система "Полигон": комплекс программных средств для сбора, хранения и обработки данных геофизических наблюдений / Г.Н. Копылова, Е.Р. Латыпов, Е.А. Пантюхин // Проблемы сейсмологии III-го тысячелетия. Матер. междунар. геофиз. конф. – Новосибирск: Изд-во СО РАН, 2003. – С. 393-399.

23. Копылова, Г.Н. Параметрический предвестник в изменениях уровня воды в скважине Е-1, Камчатка: опыт практического использования / Г.Н. Копылова, С.В. Болдина, Е.Г. Чубарова // «Физические основы прогнозирования разрушения горных пород» и «Проблемы нелинейной геомеханики на больших глубинах»: тезисы докладов X Международной школы-семинара и VI Российско-китайского научно-технического форума, Апатиты, 13-17 июня 2016 г. – Апатиты: КНЦ РАН, 2016. – С. 75.
24. Кочарян, Г.Г. Динамика деформирования блочных массивов горных пород / Г.Г. Кочарян, А.А. Спивак. – М.: ИКЦ Академкнига, 2003. – 422 с.
25. Крисюк, Э.М. Радиационный фон помещений / Э.М. Крисюк. – М.: Энергоатомиздат, 1989. – 120 с.
26. Линьков, Е.М. Сейсмогравитационные пульсации Земли и возмущения атмосферы как возможные предвестники сильных землетрясений / Е.М. Линьков, Л.Н. Петрова, К.С. Осипов // Докл. АН СССР. – 1990. – Т. 313, № 5. – С. 1095-1098.
27. Любушин, А.А. Анализ данных систем геофизического и экологического мониторинга / А.А. Любушин. – М.: Наука, 2007. – 228 с.
28. Лящук, А.И. Мониторинг концентрации радона как предвестник землетрясений в районе гор Вранча / А.И. Лящук, В.Н. Павлович, В.Д. Руссов // Геофизический журнал. – 2008. – Т. 30, № 2. – С. 63-74.
29. Макаров, Е.О. Предвестниковые аномалии сильных землетрясений Авачинского залива с  $M > 5.5$  в поле почвенного радона на Петропавловск-Камчатском геодинамическом полигоне / Е.О. Макаров // Геология в развивающемся мире: сборник научных трудов по материалам Международной конференции студентов, аспирантов и молодых ученых, г. Пермь, 20-24 апреля 2011 г. – Пермь: Перм. гос. ун-т, 2011. – С. 347-349.
30. Макаров, Е.О. Динамика подпочвенного радона на Петропавловск-Камчатском геодинамическом полигоне перед сильными землетрясениями с  $M > 5.5$  района Авачинского залива / Е.О. Макаров // XIII Уральская молодежная научная школа по геофизике, 23-27 апреля 2012 г.: сборник докладов. – Екатеринбург: ИГф УрО РАН, 2012. – С. 125-127.
31. Макаров, Е.О. Аппаратурный комплекс для регистрации концентрации подпочвенных газов с целью поиска предвестниковых аномалий сильных землетрясений Южной Камчатки / Е.О. Макаров, П.П. Фирстов, В.Н. Волошин // Сейсмические приборы. – 2012. – Т. 48, № 2. – С. 5-14.

32. Макаров, Е.О. Предвестниковые аномалии в радоновом и деформационном полях земли перед землетрясением в Авачинском заливе с  $M=5.6$ , 15.10.2012 г. / Е.О. Макаров, С.С. Сероветников // XV Уральская молодежная научная школа по геофизике: сборник докладов. – Екатеринбург: ИГф УрО РАН, 2014. – С. 152-155.
33. Маренный, А.М. Комплексные мониторинговые исследования формирования радоновых полей грунтовых массивов. Часть 5 – Результаты мониторинга радона внутри грунтовых массивов / А.М. Маренный, П.С. Микляев, А.В. Пенезев, А.А. Цапалов, А.В.Климшин, М.Н. Лопатин, М.А. Маренный, Т.Б. Петрова, Д.И. Шкуропат, А.В. Щелкунов, А.С. Янкин // Аппаратура и новости радиационных измерений. – 2015а. – № 3. – С. 52-63.
34. Маренный, А.М. Комплексные мониторинговые исследования формирования радоновых полей грунтовых массивов. Часть 6 – анализ закономерностей временных вариаций радонового поля / А.М. Маренный, П.С. Микляев, А.А. Цапалов, А.В. Климшин, Т.Б. Петрова, А.В. Пенезев // Аппаратура и новости радиационных измерений. – 2015б. – № 4. – С. 9-21.
35. Махмудов, Е.Р. Переносной регистратор геофизических параметров JORES / Е.Р. Махмудов // Сейсмические приборы. – 2015. – Т. 51, № 1. – С. 16-26.
36. Международная служба земного вращения и эталонных мер. Earth Rotation and Reference System Service. URL: <http://www.iers.org/> (дата обращения: 31.08.2016).
37. Микляев, П.С. Влияние природных факторов на плотность потока радона из грунта / П.С. Микляев, Р.С. Зиангиров // Сергеевские чтения. Выпуск 3. – М.: ГЕОС, 2001. – С. 118-123.
38. Моргунов, В.А. Крип горных пород на завершающей стадии подготовки землетрясений / В.А. Моргунов // Физика Земли. – 2001. – № 4. – С. 3-11.
39. Николаевский, В.Н. Природа бифокального очага землетрясения и предвестники удара / В.Н. Николаевский, Л.Е. Собисевич // Геофизический журнал. – 2015. – Т. 37, № 4. – С. 51-74.
40. Новиков, Г.Ф. Радиоактивные методы разведки / Г.Ф. Новиков, Ю.Н. Капков. – Л.: Недра, 1965. – 759 с.
41. Новиков, Г.Ф. Радиометрическая разведка. / Г.Ф. Новиков. – Ленинград: Наука, 1989. – 407 с.

42. Огильви, А.Н. О каптаже радиоактивных вод и о колебаниях их радиоактивности в зависимости от дебита / А.Н. Огильви. – Изд. Бальнеологич. ин-та КМВ, 1928. – Т. 6. – С. 85-93.
43. Паровик, Р.И. Апробация новой методики расчета плотности потока радона с поверхности (на примере Петропавловск-Камчатского геодинамического полигона) / Р.И. Паровик, П.П. Фирстов // Аппаратура и новости радиационных измерений. – 2009. – № 3. – С. 52-57.
44. Паровик, Р.И. Математическое моделирование неклассической теории эманационного метода. / Р.И. Паровик. – Петропавловск-Камчатский: КамГУ им. В. Беринга, 2014. – 80 с.
45. Паскарь, С.Ю. Математическое моделирование переноса радона в влагонасыщенном грунте / С.Ю. Паскарь, Р.И. Паровик // Международный студенческий научный вестник. – 2015. – № 6. – С. 1-8.
46. Понамарев, А.С. Фракционирование в гидротерме как потенциальная возможность формирования предвестников землетрясений / А.С. Понамарев // Геохимия. – 1989. – № 5. – С. 714-724.
47. Попруженко, С.В. Тектоника и некоторые особенности сейсмичности шельфовой зоны Авачинского залива и прилегающих районов / С.В. Попруженко, М.И. Зубин // Вулканология и сейсмология. – 1997. – № 2. – С. 74-82.
48. ПОС: Пакет обработки сигналов. Руководство пользователя. – М.: НПП «Мера», 1995. – 257 с.
49. Прогностика. Терминология. Сборник научно-нормативных терминов; Вып. 109. – М.: Наука, 1990. – 56 с.
50. Регель, В.Р. Кинетическая природа прочности твердых тел / В.Р. Регель, А.И. Слуцкер, Э.Е. Томашевский. – М.: Наука, 1976. – 560 с.
51. Рудаков, В.П. О барических вариациях подпочвенного радона / В.П. Рудаков // Геохимия. – 1985. – № 1. – С. 124-127.
52. Рудаков, В.П. Динамика полей подпочвенного радона сейсмоактивных регионов СНГ: автореф. дис. ... д-ра физ.-мат. наук: 04.00.22 / Рудаков Валерий Петрович. – М., 1992 г. – 56 с.
53. Рудаков, В.П. Эманационный мониторинг геосред и процессов. / В.П. Рудаков. – М.: Научный мир, 2009. – 175 с.
54. Руленко, О.П. Увеличение объемной активности радона и торона на Камчатке перед катастрофическим землетрясением в Японии 11 марта 2011 г. / О.П.

- Руленко, Ю.Д. Кузьмин // Солнечно-земные связи и физика предвестников землетрясений: труды VI международной конференции, с. Паратунка, Камчатский край, 9–13 сентября 2013 г. – Петропавловск-Камчатский: ИКИР, 2013. – С. 430-434.
55. Селиверстов, Н.И. Геодинамика зоны сочленения Курило-Камчатской и Алеутской островных дуг / Н.И. Селиверстов. – Петропавловск-Камчатский: Изд. КамГУ им. Витуса Беринга, 2009. – 191 с.
56. Сидорин, А.Я. Предвестники землетрясений / А.Я. Сидорин. – М.: Наука, 1992. – 192 С.
57. Смирнов, С.Н. Радиационная экология / С.Н. Смирнов, Д.Н. Герасимов // Физика ионизирующих излучений: Учебник для студентов вузов. – М.: МЭИ, 2006. – 325 с.
58. Соболев, Г.А. Основы прогноза землетрясений / Г.А. Соболев. – М.: Наука, 1993. – 312 С.
59. Соболев, Г.А. Физика землетрясений и предвестники / Г.А. Соболев, А.В. Пономарев. – М.: Наука, 2003. – 270 с.
60. Спивак, А.А. Особенности эманации радона  $^{222}\text{Rn}$  с глубиной / А.А. Спивак, М.В. Сухоруков, В.А. Харламов // Докл. РАН. – 2008. – Т. 420, № 6. – С.825-828.
61. Уломов, В.И. О предвестнике сильного тектонического землетрясения / В.И. Уломов, Б.З. Мавашев // ДАН СССР. – 1967. – Т. 176, № 2. – С. 35-37.
62. Уломов, В.И. Сейсмичность. Национальный атлас России. / В.И. Уломов // Природа. Экология. – 2004. – Т. 2. – С. 56-57.
63. Уткин, В.И. Радон и проблема тектонических землетрясений / В.И. Уткин, А.К. Юрков // Вулканология и сейсмология. – 1997. – № 4. – С.82-94.
64. Федотов, С.А. Энергетическая классификация Курило-Камчатских землетрясений и проблема магнитуд / С.А. Федотов. – М.: Наука, 1972. – 117 с.
65. Федотов, С.А. Сейсмичность Камчатки и Командорских островов по данным детальных исследований / С.А. Федотов, Л.С. Шумилина, Г. Чернышова // Вулканология и сейсмология. – 1987. – № 6. – С. 29-30.
66. Фирстов, П.П. Мониторинг объемной активности подпочвенного радона ( $^{222}\text{Rn}$ ) на Паратунской геотермальной системе в 1997-1998 гг. с целью поиска предвестников сильных землетрясений Камчатки / П.П. Фирстов // Вулканология и сейсмология. – 1999. – № 6. – С. 22-31.

67. Фирстов, П.П. Результаты регистрации подпочвенного радона в 1997-2000 гг. на Петропавловск-Камчатском геодинамическом полигоне / П.П. Фирстов, В.П. Рудаков // Вулканология и сейсмология. – 2003. – № 1. – С. 26-41.
68. Фирстов, П.П. Динамика молекулярного водорода и ее связь с геодеформационными процессами на Петропавловск-Камчатском геодинамическом полигоне по данным наблюдений в 1999–2003 гг. / П.П. Фирстов, В.А. Широков // Геохимия. – 2005. – № 11. – С. 1151-1160.
69. Фирстов, П.П. К вопросу влияния баровариаций на поступления радона в атмосферу / П.П. Фирстов, Е.А. Пономарев, Н.В. Чернева, А.В. Бузевич, О.П. Малышева // Вулканология и сейсмология. – 2007. – № 6. – С. 46-53.
70. Фирстов, П.П., Отражение в динамике почвенного радона на Петропавловск-Камчатском геодинамическом полигоне последней стадии подготовки землетрясений с магнитудой больше 5.5 района Авачинского залива / П.П. Фирстов, О.Е. Макаров, О.П. Малышева // Проблемы комплексного геофизического мониторинга Дальнего Востока России: труды Третьей научно-технической конференции, г. Петропавловск-Камчатский, 9-15 октября 2011 г. – Обнинск: ГС РАН, 2011. – С. 154-158.
71. Фирстов, П.П. Предвестниковые аномалии в радоновом и деформационном полях земли перед землетрясением в Авачинском заливе с  $M=5.6$ , 15.10.2012 г. / П.П. Фирстов, Е.О. Макаров, С.С. Сероветников // Вулканизм и связанные с ним процессы: сборник материалов конференции, посвящённой Дню вулканолога. – Петропавловск-Камчатский: ИВиС ДВО РАН, 2013. – С. 191-197.
72. Фирстов, П.П. Возможности прогноза сильных землетрясений по данным радонового мониторинга на Петропавловск-Камчатском геодинамическом полигоне / П.П. Фирстов // Вестник КРАУНЦ. Науки о земле. – 2014. – № 1. – Вып. 2. – С. 232-245.
73. Фирстов, П.П. Применение методики айгеноскопии для поиска предвестников сильных землетрясений в поле почвенного радона ( $^{222}\text{Rn}$ ) на Камчатке (август 2012–август 2013 гг.) / П.П. Фирстов, В.В. Исакевич, Е.О. Макаров, Д.В. Исакевич, Л.В. Грунская // Сейсмические приборы. – 2014. – Т. 50, № 3. – С. 63-75.
74. Фирстов, П.П. Реакция подпочвенного и растворенного в подземных водах радона на изменение напряженно-деформированного состояния земной коры / П.П. Фирстов, Е.О. Макаров // Сейсмические приборы. – 2015. – Т. 51, № 4. – С. 58-80.

75. Фирстов, П.П. Мониторинг концентрации почвенных газов на Петропавловск-Камчатском геодинамическом полигоне в связи с прогнозом сильных землетрясений / П.П. Фирстов, Е.О. Макаров, Р.Р. Акбашев // Сейсмические приборы. – 2015. – Т. 51, № 1. – С. 60-80.
76. Фирстов, П.П. Отражение геодинамической обстановки северо-западного обрамления Тихого океана в динамике подпочвенного радона и в газовом составе теплоносителя Мутновской ГеоЭС / П.П. Фирстов, Е.О. Макаров, А.П. Максимов, И.И. Чернев // Вулканология и сейсмология. – 2015. – № 6. – С. 22-31.
77. Фирстов, П.П. Особенности одного из типов предвестниковых аномалий землетрясений в подпочвенном радоне на пункте Паратунка (Камчатка) / П.П. Фирстов, Е.О. Макаров, С.Ю. Паскарь, Р.И. Паровик // Аппаратура и новости радиационных измерений. – 2016. – № 4 (87). – С. 55-62.
78. Фирстов, П.П. Особенности динамики подпочвенных газов перед Жупановским землетрясением 30.01.2016 г. с  $M = 7.2$  (Камчатка) / П.П. Фирстов, Е.О. Макаров, И.П. Глухова // Доклады академии наук. – 2017а. – Т. 472, № 4. – С. 462-465.
79. Фирстов, П.П. Особенности вариаций параметров поля подпочвенного радона на Петропавловск-Камчатском полигоне в пункте «Паратунка» (2011–2016 гг.) / П.П. Фирстов, Е.О. Макаров, И.П. Глухова // Сейсмические приборы. – 2017б. – Т. 53, № 2. – С. 5-22.
80. Цапалов, А.А. Результаты долговременных исследований закономерностей поведения ОА и ЭРОА радона в зданиях московского региона / А.А. Цапалов // Аппаратура и новости радиационных измерений. – 2011. – Т. 61, № 3. – С. 52-64.
81. Чебров, В.Н. Сильное землетрясение 28.02.2013 г. у юго-восточного побережья Камчатки с магнитудой  $M_w = 6.8$  по данным оперативной обработки // В.Н. Чебров, Ю.А. Кугаенко, С.А. Викулина, С.Я. Дрознина, Е.И. Иванова, Н.М. Кравченко, Е.А. Матвеевко, С.В. Митюшкина, А.А. Раевская, В.А. Салтыков, Д.В. Чебров // Вестник КРАУНЦ. Науки о Земле. – 2013а. – Вып. 21. – № 1. – С. 9-16.
82. Чебров, В.Н. Глубокое Охотоморское землетрясение 24.05.2013 г. с магнитудой  $M_w = 8.3$  – сильнейшее сейсмическое событие у берегов Камчатки за период детальных сейсмологических наблюдений / В.Н. Чебров, Ю.А. Кугаенко, С.А. Викулина, Н.М. Кравченко, Е.А. Матвеевко, С.В. Митюшкина, А.А. Раевская,

- В.А. Салтыков, Д.В. Чебров, А.В. Ландер // Вестник КРАУНЦ. Науки о Земле. – 2013б. – Вып. 21. – № 1. – С. 17-24.
83. Чебров, В.Н. Жупановское землетрясение 30.01.2015 г. с  $K_S=15.7$ ,  $M_W=7.2$ ,  $I=6$  (Камчатка) / В.Н. Чебров, Ю.А. Кугаенко, И.Р. Абубакиров, С.Я. Дрознина и др. // Вестник КРАУНЦ. Науки о Земле. – 2016. – Вып. 29. – №1. — С. 5-16.
84. Широков, В.А. О причинах возникновения “удалённых” геофизических предвестников, регистрирующихся на заключительной, около недели, стадии подготовки сильных мировых землетрясений/ В.А. Широков, А.В. Бузевич, Н.В. Широкова // Солнечно-земные связи и физика пред-вестников землетрясений: V междунар. конф., с. Паратунка Камч. край, 2–7 августа 2010 г.: сб. докл. – Петропавловск-Камчатский: ИКИР ДВО РАН. – 2010. – С. 478-482.
85. Широков, В.А. Возможный подход к краткосрочному и долгосрочному прогнозу сильнейших землетрясений на примере Тохоку (Япония) 11 марта 2011 г.,  $M_W=9.0$  / В.А Широков, П.П. Фирстов, Е.О. Макаров, И.И. Степанов, В.И. Степанов // Сейсмические приборы. – 2014. – Т. 50, № 4. – С. 5-22.
86. Яковлева, В.С. Плотность потока радона с поверхности земли как возможный индикатор изменений напряженно-деформированного состояния геологической среды / В.С. Яковлева, В.Д. Каратаев // Вулканология и сейсмология. – 2007. – № 1. – С. 74-77.
87. Яковлева, В.С. Методология многофакторного эксперимента по процессам переноса радона в системе “литосфера–атмосфера” / В.С. Яковлева, В.Д. Каратаев, А.В Вуколов, И.И. Ипполитов, М.В. Кабанов, П.М. Нагорский, С.В. Смирнов, П.П. Фирстов, Р.И. Паровик // Аппаратура и новости радиационных измерений. – 2009. – № 4. – С. 55-60.
88. Яфасов, А. Я. Радонное поле Ташкентского Мегалополиса / А.Я. Яфасов, Н.М. Мирахмедова, А.А. Яфасов // Аппаратура и новости радиационных измерений. – 2003. – Т. 32, № 1. – С. 29-33.
89. Attanasio, A. Examining Granger causality between atmospheric parameters and radon / A. Attanasio, M. Maravalle, G. Fioravanti // Nat Hazards. – 2012. – No 62. – P. 723–731.
90. Barbosa, S.M. Radon applications in geosciences / S.M. Barbosa, R.V. Donner, G. Steinitz // Progress & perspectives Eur. Phys. J. – Special Topics. – 2015. – No 224. – P. 597–603.

91. Chang, Wei Preliminary study on the application of hydrogeochemistry of earthquake prediction / Wei Chang, Y.-Y. Lin. // *Contrib. Pap. Intern. Symp. on earthquake prediction*. UNESCO: conf 801. Col. 14/111-8, Paris. 2-6 Apr. 1979. – Paris, 1979. – P. 1-14.
92. Chaudhuri, H. The enigma of helium / H. Chaudhuri, D. Ghose, R.K. Bhandari, P. Sen, B. Sinha // *Acta geod. et geophys. hung.* – 2010. – Vol. 45, No 4. – C. 452-470.
93. Chege, M.W. The influence of meteorological parameters on indoor radon in selected traditional Kenyan dwellings / M.W. Chege, I.V.S. Rathore, S.C. Chhabra, A.O. Mustapha // *Journal of Radiological Protection*. – 2009. – No 29. – P. 95-103.
94. Cicerone, R.D. systematic compilation of earthquake precursors / R.D. Cicerone, J.E. Ebel, J.A. Beittton // *Tectonophysics*. – 2009. – No 476. – P. 371-396.
95. Djefal, S. Further investigation on radon emanation along seismic faults in northern Algeria / S. Djefal, M. Allab, D.E. Cherouayi // *Nucl. Geophys.* – 1994. – Vol. 8, No 6. – P.583-591.
96. Dubinchuk, V.T. Radon as a precursor of earthquakes / Isotopic geochemical precursors of earthquakes and volcanic eruption. / V.T. Dubinchuk // *Proceedings of an Advisory Group Meeting held in Vienna, Vienna, 9-12 September 1991.* – Vienna, 1991. – P. 6-22.
97. Einarsson, P. Radon monitoring programs in the South Iceland Seismic Zone 1977-2006 / P. Einarsson, P. Theodórsson, Á.R. Hjartardóttir, G. Jónsson, G. Guðjónsson // *Proceedings of International Brainstorming Session on Geochemical Precursors for Earthquakes, Saha Institute of Nuclear Physics & Variable Energy Cyclotron Centre, Kolkata, India, September 11-13, 2006.* – India: Macmillan India Ltd, 2007. – P. 3-11.
98. Etiopo, G. Migration of carrier and trace gases in the geosphere: an overview / G. Etiopo, G. Martinelli // *Phys.Earth Planet. Inter.* – 2002. – Vol. 129. – P.185-204.
99. Firstov, P.P. The nexus of soil radon and hydrogen dynamics and seismicity of the northern flank of the Kuril-Kamchatka subduction zone / P.P. Firstov, V.S. Yakovleva, V.A. Shirokov at. all // *Ann. Geophys.* – 2007. – Vol. 50, No 4. – P.546-557.
100. Grammakov, A.G. On the influence of same factors in the spreading of radioactive emanations under natural conditions /A.G. Grammakov // *Zhur. Geoziki.* – 1936. – Vol. 6. – P.123-148.
101. Hatuda, Z. Radon content and its change in soil air near the ground surface / Z. Hatuda // *Mem. Col. Sci. Univ. Kyoto.* – 1953. – Ser. B, 20. – P. 285-306.

102. Hirotaka, U.I. Anomalously high radon discharge from Atotsugawa Fault prior to the western Nagano Prefecture earthquake (M 6.8) of September 14, 1984 / U.I. Hirotaka, H. Moriuchi, Y. Takemura, H. Tsuchida, I. Fujii, M. Nakamura // *Tectonophysics* – 1988. – No 152. – P. 147-152.
103. Igarashi, G. Ground-water radon anomaly before the Kobe earthquake in Japan / G. Igarashi, S. Saeki, N. Takahata, K. Sumikawa, S. Tasaka, Y. Sasaki, M. Takahashi, Y. Sano // *Science*. – 1995. – Vol. 269. – P. 60-61.
104. Inan, S. Geochemical monitoring in the Marmara region (NW Turkey): A search for precursors of seismic activity / S. Inan, T. Akgül, C. Seyis, R. Saatçılar, S. Baykut, S. Ergintav, M. Baş // *Journal of Geophysical Research*. – 2008. – Vol. 113. – B03401. – P. 01-41.
105. Kawada, Y. Time-scale invariant changes in atmospheric radon concentration and crustal strain prior to a large earthquake / Y. Kawada, H. Nagahama, Y. Omori, Y. Yasuoka, T. Ishikawa, S. Tokonami, M. Shinogi // *Nonlin. Processes Geophys.* – 2007. Vol. 14. – P. 123-130.
106. King, C.Y. Gas-geochemical approaches to earthquake prediction / C.Y. King. // *Proceedings of an Advisory Group Meeting held in Vienna, Vienna, 9-12 September 1991.* – Vienna, 1991. – P. 22-36.
107. King, C.Y. Spatial radon anomalies on active faults in California / C.Y. King, B.S. King, W.S. Evans, W. Zhang // *Applied Geochemistry*. – 1996. – No 11. – P. 497-510.
108. King, C.Y. Earthquake induced groundwater and gas changes / C.Y. King, W. Zhang, Z.C. Zhang // *Pure Appl. Geophys.* – 2006. – Vol. 163. – P. 633-645.
109. Klusman, R. W. Preliminary analysis of meteorological and seasonal influences on crustal gas emission relevant to earthquake prediction / R.W. Klusman, J.D. Webster // *Bul. Seismol. Soc. of America*. – 1988. – Vol. 71, No 1. – P. 211-222.
110. Krewski, D. Residential radon and risk of lung cancer: a combined analysis of 7 North American case-control studies. / D. Krewski, J.H. Lubin, J.M. Zielinski, M. Alavanja, V.S. Catalan, R.W. Field, J.B. Klotz, E.G. Létourneau, C.F. Lynch, J.I. Lyon, D.P. Sandler, J.B. Schoenberg, D.J. Steck, J.A. Stolwijk, C. Weinberg, H.B. Wilcox // *Epidemiology*. – 2005. – Vol. 2, No 16. – P. 137-45.
111. Ondoh, T. Investigation of precursory phenomena in the ionosphere, atmosphere and ground water before large earthquakes of  $M > 6.5$  / T. Ondoh // *Adv. Space Res.* – 2009. – Vol. 43. – P. 214-223.
112. Ramola, R.C. Soil-gas radon as seismotectonic indicator in Garhwal Himalaya /

- R.S. Ramola, Yogesh Prasad, Ganesh Prasad, Sushil Kumar, V.M. Choubey // *Appl. Radiat. and Isotop.: International Journal of Radiation Applications and Instrumentation.* – 2008. – Vol. 66, No 10. – C. 1523-1530.
113. Sedat, İ. Geochemical monitoring in the Marmara region (NW Turkey): a search for precursors of seismic activity / İ. Sedat, A. Tayfun, S. Cemil, S. Ruhi, B. Süleyman, E. Semih, B. Mahmut, *J. Geophys. // Res. B.* – 2008. – Vol. 113, No 3. – C. 1-15.
114. Shengelaia, G. On possible precursor of the Tbilisi earthquake on april 25, 2002 / G. Shengelaia, K. Danelia, K. Zardiashvili, A. Khunjua, T. Khunjua // *Bull. Georg. Acad. Sci.* – 2002. – Vol. 166, No 3. – P. 499-501.
115. Steinitz, G. statistically significant relation between radon flux and weak earthquakes in the Dead Sea Rift Valley / G. Steinitz, Z.B. Begin, N.A. Gazit-Yaari // *Geology.* – 2003. – Vol. 31. – P.505-508.
116. Sturrock, P.A. Analysis of Radon-Chain Decay Measurements: Evidence of Solar Influences and Inferences Concerning Solar Internal Structure and the Role of Neutrinos / P.A. Sturrock, G. Steinitz, E. Fischbach. URL: [www.researchgate.net/publication/316821285](http://www.researchgate.net/publication/316821285) (дата обращения: 26.05.2017).
117. Teng, Ta-Liang, Some recent studies on groundwater radon content as an earthquake precursor. / Ta-Liang Teng // *Journ. Geoph. Res.* – 1980. – Vol. 6, No 85. – P. 3089-3099.
118. Toutain, J-P. Gas geochemistry and seismotectonics: a review / J-P. Toutain, J-C. Baubron // *Tectonophysics.* – 1999. – No 304 – P. 1-27.
119. Tsunomori, F. Seismic Response of Dissolved Gas in Groundwater. / F. Tsunomori, H. Tanaka, M. Murakami, S. Tasaka // *Proceedings of the 10th Taiwan-Japan International Workshop on Hydrological and Geochemical Research for Earthquake Prediction, Tainan, Taiwan, October 25, 2011.* – National Cheng Kung University, 2011. – P. 29-35.
120. Varhegyi, A. model for the vertical subsurface radon transport in “geogas” microbubbles / A. Varhegyi, I. Baranyi, G.A. Somogyi // *Geophys. Transactions.* – 1986. – Vol. 32, No 3. – P.235-253.
121. Vasilyev, A.V. Determination of mechanisms and parameters which affect radon entry into a room / A.V. Vasilyev, M.V. Zhukovsky // *J Environ Radioact.* – 2013. – No 124. – P. 185-190.

122. Virk, H.S. Radon anomalies in soil-gas and groundwater as earthquake precursor phenomena / H.S. Virk, S. Baljinder // *Tectonophysics*. – 1993. – No 77. – P. 215-224.
123. Virk, H.S. Correlation of alpha-logger radon data with microseismicity in N-W Himalaya / H.S. Virk, A.K. Sharma, V. Walia // *Curr. Sci.*– 1997. – No 72 (9). – P. 656-663.
124. Wakita, H. Precursory changes in ground water prior to the 1978 Izu-Oshima-Kinkai Earthquake. / H. Wakita // *In Earthquake Prediction: An International Review*, American Geophysical Union, Maurice Ewing Series 4. – 1981. – P. 527-532.
125. Wakita, H. Short term thermal and Hydrological signatures related to tectonic activities. / H. Wakita // *Thermal and Hydrological signatures related to seismic events in Japan – Work-shop Walferdange*. – 1995. – P. 29-64.
126. Yakovleva, V.S. Solution of diffusion-advection equation of radon transport in many-layered geological media / V.S. Yakovleva, R.I. Parovik // *Nukleonika*. – 2010. – Vol. 55, No 4. – P. 601-606.
127. Yasuoka, Y. Anomaly in atmospheric radon concentration: a possible precursor of the 1995 Kobe / Y. Yasuoka, M. Shinogi // *Japan, earthquake, Health Phys.*– 1997. – No 72. – P. 759-761.
128. Yasuoka, Y. Evidence of precursor phenomena in the Kobe earthquake obtained from atmospheric radon concentration / Y. Yasuoka, G. Igarashi, T. Ishikawa, S. Tokonami, M. Shinogi // *Appl. Geochem.* – 2006. – No 21. – P. 1064-1072.
129. Zhan, W. A New Study Item of Earthquake Precursors: The Escaping Gas Rn in Groundwater / W. Zhan, Y. Shi, P. Zhang // *Earthquakes Research in China*. – 1994. – Vol. 8, No 1. – P. 39-47.

## ОБОЗНАЧЕНИЯ И СОКРАЩЕНИЯ

АРМ	– акустический и радоновый мониторинг;
ВСГ-2	– водородный сигнализатор геофизический;
ЖЗ	– Жупановское землетрясение, 30.01.2016 г., $M = 7.2$ , $H = 177$ км;
ЗАЗ	– землетрясение Авачинского залива, 19.02.2016 г., $M = 5.5$ , $H = 82$ км;
ЗДВ	– зона динамического влияния;
ЗВ	– зона влагонасыщения;
ИНС	– скважина ИИС-1 вблизи здания Института вулканологии и сейсмологии ДВО РАН;
ИС	– информационная система;
КВО	– кратность воздухообмена, $\text{ч}^{-1}$ ;
КЗ	– Кроноцкое землетрясение, 05.12.1997 г., $M = 7.7$ , $H = 33$ км;
КРК	– район поселка Северные Коряки, пойма р. Гаванка;
КРМ	– стационар «Верхнепаратунский» ИВиС ДВО РАН, пойма р. Карымшина;
КФ РЭС	– камчатский филиал Российского экспертного Совета по прогнозу землетрясений, сейсмической опасности и риска;
ЛВЧ	– пойма р. Левая Авача;
МПВ	– метод преломленных волн;
МРЗ	– скважина «Морозная-1», гора Морозная, пойма р. Половинка;
НЛЧ	– пограничная застава «Налычево»;
ОА Rn	– объемная активность радона, $\text{Бк}/\text{м}^3$ ;
ОДС	– отклонение длительности суток;
ОЗ	– Охотоморское землетрясение 24.05.2013 г., $M = 8.3$ , $H = 630$ км;
ПОС	– пакет обработки сигналов НПП "Мера";
ППН	– Природный парк «Налычево»;
ППР	– плотность потока радона с поверхности, $\text{мБк}/(\text{м}^2 \cdot \text{с})$ ;
ПР	– подпочвенный радон;
ПРТ	– опорный пункт, долина ручья «Коркина», пос. Паратунка;
ПРТ1	– геотермальный стационар ИВиС ДВО РАН в пос. Паратунка;
ПЭВМ	– персональная электронно-вычислительная машина;
РЕВАР	– регистратор вариаций радона;
РКПГ	– комплекс регистрации концентрации подпочвенных газов;

СП	– сейсмический профиль;
УГВ	– уровень грунтовых вод;
РЕТТ	– наклономерная станция «Петропавловск»;
PSTN	– Public Switched Telephone Network, телефонная сеть общего пользования;
UTC	– Coordinated Universal Time.

Справка КФ РЭС о представленных заключениях с оценкой сейсмической опасности для Камчатского региона за период 01.01.2016 – 02.06.2017 гг.

РОССИЙСКАЯ АКАДЕМИЯ НАУК  
**КАМЧАТСКИЙ ФИЛИАЛ**  
**РОССИЙСКОГО ЭКСПЕРТНОГО СОВЕТА**  
**ПО ПРОГНОЗУ ЗЕМЛЕТРЯСЕНИЙ,**  
**ОЦЕНКЕ СЕЙСМИЧЕСКОЙ ОПАСНОСТИ**  
**И РИСКА**

683006, Петропавловск - Камчатский  
бульвар Пийпа,9  
телефон: (41522) 58898  
телефакс: (41522) 57321  
E-mail: chebr@emsd.ru

02.06.2017 № 75

На № \_\_\_\_\_ от \_\_\_\_\_

Справка КФ РЭС № 38

С декабря 2008 г. регулярно, с периодичностью один раз в неделю, в Камчатский филиал Российского экспертного совета по прогнозу землетрясений, оценке сейсмической опасности и риска (КФ РЭС) сотрудниками лаборатории акустического и радонового мониторинга (ЛАРМ) Камчатского филиала Геофизической службы (КФ ГС РАН) Фирстовым П.П., Макаровым Е.О. и Глуховой И.П. представляются заключения,

содержащие оценку сейсмической опасности для Камчатского региона по данным измерений концентрации радона, водорода и углекислого газа в подпочвенном воздухе на сети пунктов. Стандартная схема расположения районов в пределах полуострова Камчатка с прогнозируемой магнитудой приведена на рисунке 1.

Заключения ЛАРМ используются для анализа сейсмической опасности в Камчатском крае по комплексу данных и учитываются в сообщениях КФ РЭС, которые передаются согласно регламенту организациям и службам Камчатской системы РСЧС.

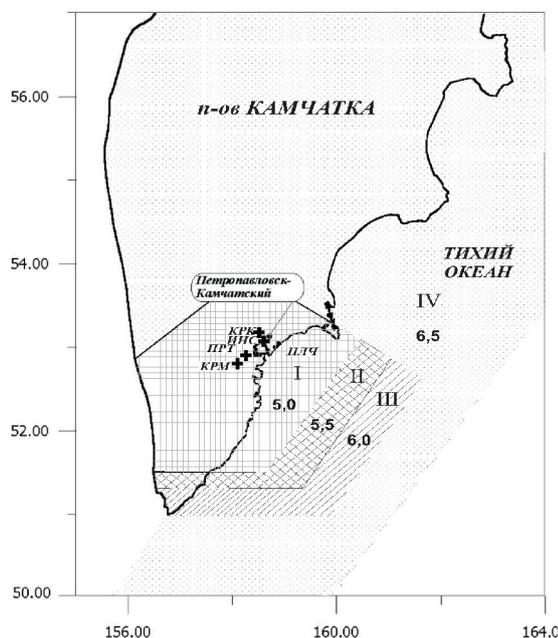


Рис. 1. Стандартная схема расположения районов в пределах полуострова Камчатка с прогнозируемой магнитудой.

В 2016 г. в КФ РЭС сотрудниками ЛАРМ были поданы следующие заключения, содержащие прогнозные оценки:

1. **От 28 января 2016 г.** о возможности возникновения землетрясений с глубиной очага менее 90 км и с магнитудами больше указанных в соответствующих районах, отмеченных на рис.1, или землетрясений с  $M > 6.5$  в полосе ограниченной по широте  $49.5^\circ - 56^\circ$  с.ш. и осью глубоководного желоба с 28 января 2016 г. по 4 февраля 2016 г.

30 января 2016 г. в 03:25 UTC произошло Жупановское землетрясение с  $M_c=7.1$ ,  $M_l=7.1$ , координаты  $\varphi=53.85^\circ N$ ,  $\lambda=159.04^\circ E$ , глубина  $H=178$  км (данные КФ ГС РАН),  $M_w=7.2$  (данные NEIC). Указанный в заключении прогноз оправдался в отношении магнитуд возможных землетрясений.

2. **От 18 февраля 2016 г.** о возможности возникновения землетрясений с глубиной очага менее 90 км и с магнитудами больше указанных в соответствующих районах, отмеченных на рис.1, или землетрясений с  $M > 6.5$  в полосе ограниченной по широте  $49.5^\circ - 56^\circ$  с.ш. и осью глубоководного желоба с 18 февраля 2016 г. по 25 февраля 2016 г. Прогноз еженедельно продлевался вплоть до 24 марта 2016 г.

20 марта 2016 г. в 22:50 UTC произошло землетрясение с  $M_c=6.7$ ,  $M_l=6.7$ , координаты  $\varphi=54.14^\circ N$ ,  $\lambda=163.14^\circ E$ , глубина  $H=43$  км (данные КФ ГС РАН),  $M_w=6.4$  (данные NEIC), которое соответствует прогнозируемым событиям по всем параметрам.

3. **От 14 апреля 2016 г.** о возможности возникновения землетрясений с глубиной очага менее 90 км и с магнитудами больше указанных в соответствующих районах, отмеченных на рис.1, или землетрясений с  $M > 6.5$  в полосе ограниченной по широте  $49.5^\circ - 56^\circ$  с.ш. и осью глубоководного желоба с 14 апреля 2016 г. по 21 апреля 2016 г.

14 апреля 2016 г. в 03:06 UTC произошло землетрясение с  $M_c=5.8$ ,  $M_l=6.2$ , координаты  $\varphi=53.66^\circ N$ ,  $\lambda=161.11^\circ E$ , глубина  $H=48$  км, (данные КФ ГС РАН),  $m_{ww}=5.8$  (данные NEIC). Указанный в заключении прогноз оправдался в отношении времени и местоположения возможных землетрясений и не оправдался в отношении энергетических параметров.

4. **От 27 апреля 2016 г.** о возможности возникновения землетрясений с глубиной очага менее 90 км и с магнитудами больше указанных в соответствующих районах, отмеченных на рис.1, или землетрясений с  $M > 6.5$  в полосе ограниченной по широте  $49.5^\circ - 56^\circ$  с.ш. и осью глубоководного желоба с 27 апреля 2016 г. по 5 мая 2016 г. Прогноз еженедельно продлевался вплоть до 16 июня 2016 г.

15 мая 2016 г. в 04:13 UTC произошло землетрясение с  $M_c=4.0$ ,  $M_l=5.2$ , координаты  $\varphi=51.54^\circ N$ ,  $\lambda=158.18^\circ E$ , глубина  $H=80$  км, (данные КФ ГС РАН), которое соответствует прогнозируемым для района I (рис. 1) событиям по всем параметрам. Но прогноз не был снят.

5. **От 30 июня 2016 г.** о возможности возникновения землетрясений с глубиной очага менее 90 км и с магнитудами больше указанных в соответствующих районах, отмеченных на рис.1, или землетрясений с  $M > 6.5$  в полосе ограниченной по широте  $49.5^\circ - 56^\circ$  с.ш. и осью глубоководного желоба с 30 июня 2016 г. по 7 июля 2016 г.

В указанный период землетрясений, соответствующих прогнозируемым параметрам, не зарегистрировано.

6. **От 11 августа 2016 г.** о возможности возникновения землетрясений с глубиной очага менее 90 км и с магнитудами больше указанных в соответствующих районах, отмеченных на рис.1, или землетрясений с  $M > 6.5$  в полосе ограниченной по широте  $49.5^\circ - 56^\circ$  с.ш. и осью глубоководного желоба с 11 августа 2016 г. по 18 августа 2016 г.

В указанный период землетрясений, соответствующих прогнозируемым параметрам, не зарегистрировано.

7. **От 27 октября 2016 г.** о возможности возникновения землетрясений с глубиной очага менее 90 км и с магнитудами больше указанных в соответствующих районах, отмеченных на рис.1, или землетрясений с  $M > 6.5$  в полосе ограниченной по широте  $49.5^\circ - 56^\circ$  с.ш. и осью глубоководного желоба с 27 октября 2016 г. по 03 ноября 2016 г. Прогноз продлевался до 10 ноября 2016 г.

02 ноября 2016 г. в 03:44 UTC произошло землетрясение с  $M_c=5.9$ ,  $M_l=5.9$ , координаты  $\varphi=54.7^\circ N$ ,  $\lambda=163.8^\circ E$ , глубина  $H=68$  км, (данные КФ ГС РАН),  $mb = 5.4$  (данные NEIC). Указанный в заключении прогноз оправдался в отношении времени и местоположения возможных землетрясений и не оправдался в отношении энергетических параметров.

8. **От 22 декабря 2016 г.** о возможности возникновения землетрясений с глубиной очага менее 90 км и с магнитудами больше указанных в соответствующих районах, отмеченных на рис.1, или землетрясений с  $M > 6.5$  в полосе ограниченной по широте  $49.5^\circ - 56^\circ$  с.ш. и осью глубоководного желоба с 22 декабря 2016 г. по 29 декабря 2016 г.

22 декабря 2016 г. в 16:05 UTC произошло землетрясение с  $M_c=6.1$ ,  $M_l=5.7$ , координаты  $\varphi=55.07^\circ N$ ,  $\lambda=164.79^\circ E$ , глубина  $H=54$  км, (данные КФ ГС РАН),  $mb = 5.2$  (данные NEIC), которое не соответствует прогнозируемым в районе IV (рис. 1) событиям по энергетическим параметрам.

30 декабря 2016 г. в 17:13 UTC произошло землетрясение с  $M_l=5.4$ , координаты  $\varphi=52.83^\circ N$ ,  $\lambda=159.98^\circ E$ , глубина  $H=54$  км, (данные КФ ГС РАН),  $mb = 4.9$  (данные NEIC). Указанный в заключении прогноз оправдался в отношении местоположения и энергетических параметров землетрясений, возможных в районе I (рис. 1).

Следует отметить, что в 2016 г. произошли землетрясения, соответствующие прогнозируемым по данной методике:

20160628	$\varphi=53.26^\circ N$	$\lambda=159.95^\circ E$	$H=86$ км	$M_c=4.4$	$M_l=5.4$	$mb=4.9$	район I
20160714	$\varphi=52.59^\circ N$	$\lambda=161.13^\circ E$	$H=45$ км	$M_c=5.0$	$M_l=5.6$	$mb=5.1$	район II
20160810	$\varphi=52.66^\circ N$	$\lambda=159.73^\circ E$	$H=51$ км		$M_l=5.2$	$mb=4.7$	район I

не предварявшиеся прогнозными заключениями.

Справка дана Макарову Евгению Олеговичу для предъявления по месту требования.

Председатель КФ РЭС

Д.В. Чебров

02 июня 2017 г.



## Приложение Б.

(справочное)

Заключение о сейсмической опасности для Камчатского края по состоянию на 28 января 2016 г. по данным мониторинга на сети пунктов КФ ЕГС РАН концентрации подпочвенных газов.

**Заключение о сейсмической опасности для Камчатского края по состоянию на «28» января 2016 г. по данным мониторинга на сети пунктов КФ ЕГС РАН концентрации подпочвенных газов**

**1. Организация.** Камчатский филиал ГС РАН

**2. Виды наблюдений.** Геохимический: измерение концентрации радона, водорода и углекислого газа в подпочвенном воздухе на сети пунктов

**3. Пункты наблюдений.** Паратунка (ПРТ), Карымшина (КРМ), Коряки (КРК), здание ИВиС (ИНС1), наблюдения на скважине НИС1, расположенной вблизи здания ИВиС (ИНС2).

**4. Время последнего наблюдения.** «26» января 2016 г.

**5. Характеристика режима наблюдений.**

**Пункт «Паратунка» (ПРТ).** В пункте ПРТ работают два регистратора вариаций ОА Rn. Регистрация осуществляется в зоне аэрации и в зоне полного влагонасыщения. Осуществляется мониторинг концентрации молекулярного водорода и углекислого газа в подпочвенном воздухе, а также метеорологических величин с помощью регистратора ALMEMO с частотой измерения 6 цикл/час. Съём информации в нормальном режиме осуществляется два раза в неделю.

**Пункт «Карымшинский стационар» (КРМ).** В пункте работает регистратор ALMEMO с двухканальным формирователем импульсов ВМ-2 для регистрации концентрации Rn в заборной емкости на глубине 2 м и накопительной емкости большого объема. С пунктом осуществляется удаленная связь по каналу GSM.

**Пункт «Коряки» (КРК).** Регистрация концентрации Rn в подпочвенном воздухе осуществляется в одной точке на глубине 0.5 м. Съём информации в нормальном режиме осуществляется не реже одного раза в месяц.

**Пункт в здании ИВиС (ИНС1).** С 1.02.2001 г. в подвале здания ИВиС установлен одноканальный «РЕВАР». В бункере над скважиной НИС1, расположенной рядом со зданием ИВиС, установлена система ALMEMO для регистрации радона в 4 точках, концентрации углекислого газа в воздухе ствола скважины и метеорологические величины. Съём информации в нормальном режиме осуществляется не реже двух раз в неделю.

**6. Анализируемые параметры, их количество, общее число каналов регистрации.**

Регистрируется объемная концентрация Rn в подпочвенном воздухе в пунктах сети радонового мониторинга, кроме того регистрируется концентрация молекулярного водорода (ПРТ, ИНС2) и концентрация углекислого газа в ПРТ и в стволе скважины НИС1 (ИНС2) и метеорологические величины.

**7. Заключение**

Совместный анализ данных мониторинга концентрации подпочвенных газов позволяет сделать вывод, что с 28 января 2016 г. по 4 февраля 2016 г. **возможно** возникновение землетрясений с глубиной очага менее 90 км и с магнитудами больше указанных в соответствующих районах, отмеченных на рис.1, или землетрясений с  $M > 6.5$  в полосе ограниченной по широте  $49.5^\circ - 56^\circ$  с.ш. и осью глубоководного желоба.

**8. Иллюстрационные и поясняющие материалы**

1. Рис.1 – карта района.
2. Рис.2 - графики концентрации почвенных газов в различных пунктах сети.

**9. Исполнители**

П.П. Фирстов, Е.О. Макаров, И.П. Глухова