

*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

**АВТОРЕФЕРАТ**  
диссертации на соискание ученой степени  
кандидата физико-математических наук

Петропавловск-Камчатский – 2017

Работа выполнена в Федеральном государственном бюджетном учреждении науки Камчатском филиале Федерального исследовательского центра «Единая геофизическая служба РАН» (КФ ФИЦ ЕГС РАН).

**Научный руководитель:**

*Фирстов Павел Павлович*, доктор физико-математических наук, Федеральное государственное бюджетное учреждение науки Камчатский филиал Федерального исследовательского центра «Единая геофизическая служба РАН», г. Петропавловск-Камчатский, заведующий лабораторией.

**Официальные оппоненты:**

*Быков Виктор Геннадьевич*, доктор физико-математических наук, Федеральное государственное бюджетное учреждение науки Институт тектоники и геофизики им. Ю.А. Косыгина Дальневосточного отделения Российской академии наук, г. Хабаровск, заместитель директора по научной работе.

*Нафикова Альбина Ринатовна*, кандидат физико-математических наук, Стерлитамакский филиал Федерального государственного образовательного учреждения высшего образования «Башкирский государственный университет», г. Стерлитамак, доцент кафедры математического моделирования.

**Ведущая организация:**

Федеральное государственное бюджетное учреждение науки Тихоокеанский океанологический институт им. В.И. Ильичева Дальневосточного отделения Российской академии наук, г. Владивосток.

Защита состоится 03 октября 2017 г. в 15-20 час. на заседании объединенного диссертационного совета Д999.004.03 при Федеральном государственном бюджетном учреждении науки Институте морской геологии и геофизики Дальневосточного отделения Российской академии наук (ИМГиГ ДВО РАН), Федеральном государственном бюджетном учреждении науки Институте вулканологии и сейсмологии Дальневосточного отделения Российской академии наук (ИВиС ДВО РАН), Федеральном государственном бюджетном учреждении науки Институте космофизических исследований и распространения радиоволн Дальневосточного отделения Российской академии наук (ИКИР ДВО РАН) по адресу: 684034, Камчатский край, Елизовский район, п. Паратунка, ул. Мирная, д. 7.

С диссертацией можно ознакомиться в библиотеках ИМГиГ ДВО РАН, ИВиС ДВО РАН, ИКИР ДВО РАН и на сайте [www.imgg.ru](http://www.imgg.ru). Автореферат размещен на официальном сайте Высшей аттестационной комиссии при Министерстве образования и науки Российской Федерации <http://vak.ed.gov.ru/> и на сайте [www.imgg.ru](http://www.imgg.ru).

Отзывы на автореферат, заверенные печатью, в 2-х экземплярах направлять по адресу: 693022, г. Южно-Сахалинск, ул. Науки, 1Б. Тел/факс 8 (4242) 791-517, E-mail: [m.andreeva@imgg.ru](mailto:m.andreeva@imgg.ru), ученому секретарю диссертационного совета Марине Юрьевне Андреевой.

Автореферат разослан « \_\_\_\_ » \_\_\_\_\_ 2017 г.

Ученый секретарь  
диссертационного совета Д999.004.03  
кандидат физико-математических наук



М.Ю. Андреева

## ОБЩАЯ ХАРАКТЕРИСТИКА РАБОТЫ

### 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. 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. Предвестниковые сигналы подготовки сильных землетрясений могут проявляться в изменениях концентрации  $\text{Rn}$  в подпочвенном, атмосферном воздухе и в воде.

Полученные результаты наблюдений в сейсмоактивных районах мира дают основание для использования данных мониторинга концентрации подпочвенного  $\text{Rn}$  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 ( $\text{OA Rn}$ ) 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 Rn с сейсмичностью района Авачинского залива представляет практический интерес для пони-

мания 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.

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 27 статей, в том числе 8 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 безвозмездно 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.

## **ОСНОВНОЕ СОДЕРЖАНИЕ РАБОТЫ**

**Введение.** Во введении отражена актуальность темы исследований, характеризуются научная новизна и практическая значимость полученных

результатов, их достоверность, сформулированы защищаемые положения, а так же цели и задачи диссертационного исследования, приводятся сведения об апробации и структуре работы.

**В первой главе** рассмотрены общие представления о радоне (Rn) как продукте распада радиоактивных нуклидов уранового ряда радиевой группы и механизме его миграции к земной поверхности. Дан краткий обзор работ, посвященных исследованиям предвестниковых аномалий в динамике Rn. Влияние изменения напряженно-деформированного состояния геосреды на миграцию Rn и возможность выделения аномалий, обусловленных этим процессом, рассмотрены во многих работах российских и зарубежных исследователей.

В обзорных работах [Chang, Lin, 1979; Зубков, 1981; Dubinchuk, 1991; Cicerone et al., 2009], собраны и систематизированы многочисленные данные о радоновых предвестниках, выделены их типы с различными временами упреждения ( $t_{\text{упр}}$ ): долгосрочные (несколько лет), среднесрочные (около года), краткосрочные (2–6 месяцев), оперативные (часы-сутки). Изучены особенности радоновых аномалий, их морфология и сделаны попытки объяснения их физической природы. Показано, что они регистрируются на значительных расстояниях от эпицентров землетрясений с диапазоном магнитуд  $M = 4-8$  и возникают при деформациях  $10^{-6}-10^{-8}$ , связанных с изменениями напряженно-деформированного состояния геосреды в пункте наблюдения. По морфологическим признакам выделяются аномалии: импульсные и ступенчатые с длительностью аномалии ( $t_{\text{ан}}$ ) до 5 суток; бухтообразные, положительной и отрицательной полярности с  $t_{\text{ан}}$  от 5 до 50 суток; имеющие характер тренда, часто продолжающиеся после землетрясения с  $t_{\text{ан}}$  более 50 суток. Относительные изменения концентрации Rn чаще всего находились в пределах 20–200 % от фона, но отмечены случаи вариаций более чем 1200 %.

Сложность поиска предвестников землетрясений в поле подпочвенного Rn состоит в том, что из всего многообразия факторов, влияющих на его динамику, надо выявить вариации, связанные с изменениями напряженно-деформированного состояния среды.

**Во второй главе** дано описание сети пунктов (рисунок 1), системы мониторинга и аппаратурного комплекса для регистрации концентрации почвенных газов, разработанного и созданного с целью автоматизации в лаборатории акустического и радонового мониторинга (АРМ) КФ ФИЦ ЕГС РАН при участии автора [Макаров и др., 2012]. В качестве датчиков используются газоразрядные счетчики, позволяющие вести пассивную регистрацию Rn по  $\beta$ -излучению продуктов его распада, располагающиеся в накопительных камерах на двух глубинах зоны аэрации (один и два метра), что является особенностью сети пунктов. Для счета импульсов

с газоразрядных счетчиков в лаборатории АРМ с участием автора были разработаны и изготовлены двухканальные и четырехканальные формирователи импульсов ВМ-2/4. Одновременно со счетом импульсов регистрируются метеорологические величины (температура и давление), углекислый газ и молекулярный водород ( $H_2$ ). Переход от импульсов к ОА  $Rn$  осуществлялся по эмпирической формуле  $ОА Rn (Бк/м^3) = 9 \cdot N$ , где  $N$  – число зарегистрированных датчиками  $\beta$ -излучения импульсов за минуту, полученной в результате одновременной регистрации сертифицированными радиометрами RS-410F фирмы femto-TECH (США), PPA-01M-03 фирмы ООО НТМ-Защита (Россия) и РКПГ с ВМ-2/4.

Под руководством автора в лаборатории АРМ КФ ЕГС РАН была разработана и внедрена автоматизированная система сбора данных с пунктов сети, работающая в режиме, близком к реальному времени по различным каналам связи.

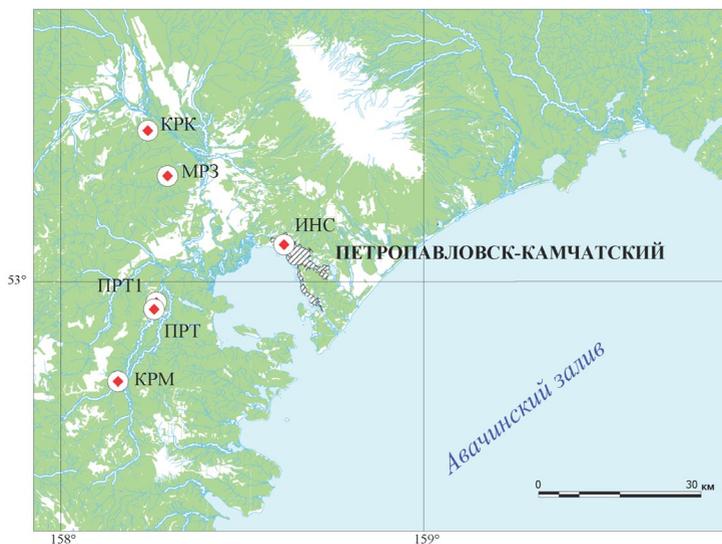


Рисунок 1 – Схема размещения пунктов регистрации концентрации подпочвенных газов в 2016 г. на Петропавловск-Камчатском геодинамическом полигоне.

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.

*При организации пунктов мониторинга подпочвенного  $Rn$  с целью расширения сети необходимо знать величину плотности потока*

Rn 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.

В разделе 2.6 дано описание метода оценки ППР с использованием кривой накопления Rn в камере. Выход значения ОА Rn на равновесие определяется ППР и кратностью воздухообмена (КВО) в камере. Для оценки этих параметров использовано математическое описание процесса изменения ОА Rn во времени, согласно подходу из работы [Vasilyev, Zhukovsky, 2013].

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

$$\frac{dA(t)}{dt} = S(t) - (A(t) - A_{Rn}^{amm}) \cdot \lambda_v(t) - (A(t) - A_{Rn}^{amm}) \cdot \lambda_{Rn}, \quad (1)$$

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 Rn;  $A_{Rn}^{amm}$  – ОА Rn 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 (1) можно пренебречь. Постоянная  $A_{Rn}^{amm}$  также не учитывалась. 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 Rn  $S$  обусловлена двумя основными механизмами: диффузионным и конвективным  $S = S_D + S_C$ , где  $S_D$  и  $S_C$  соответственно скорости диффузионного и конвективного поступления Rn в накопительную камеру, Бк/(м<sup>3</sup>·ч).

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 Rn  $S_D = (q \times \Pi) / V$ , где  $V$  – объема накопительной камеры, м<sup>3</sup>;  $\Pi$  – площадь натекая 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 (1):

$$A(t) = A_{\max} \cdot (1 - e^{-\lambda_0 \cdot t}) + A_0 \cdot e^{-\lambda_0 \cdot t}, \quad (2)$$

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) 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 (рисунок 2).

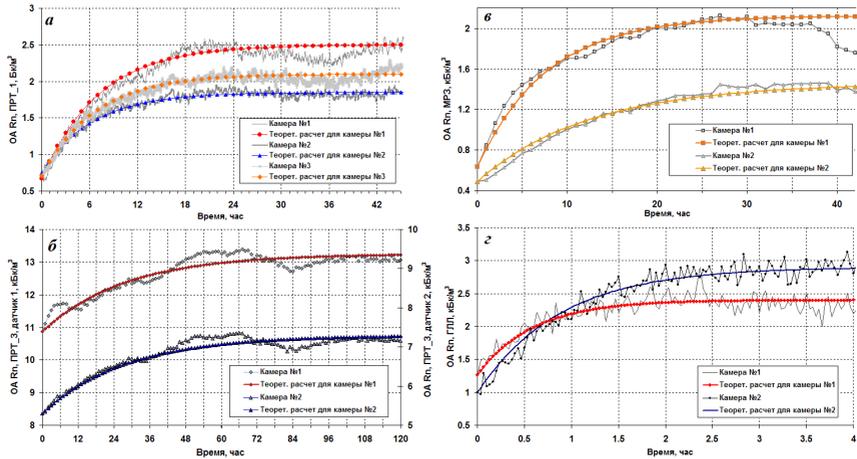


Рисунок 2 – Расчетные кривые накопление Рп в камере с параметрами, обеспечивающими удовлетворительное совпадение с экспериментальными: а, б – пункт ПРТ, в – пункт МРЗ, г – пункт ГЛЛ. Схема расположения пунктов показана на рисунке 1.

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  $A_{\max}$  экспериментальных кривых, были рассчитаны ППП для четырех пунктов мониторинга подпочвенных газов по формуле:

$$q = (A_{\max} \cdot \lambda_0 \cdot V) / \Pi, \quad (3)$$

которые составили  $3.1 \pm 0.3 - 27 \pm 1.1 \text{ мБк}/(\text{м}^2 \cdot \text{с})$ .

Предложенная методика в первом приближении дает возможность оценить величину ППП в точке установки накопительной камеры с учетом погрешности, в результате осреднения экспериментальных данных. 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/( $\text{м}^2 \cdot \text{с}$ ) и один метр  $q_1 = 14.9 \pm 1.1$  МБк/( $\text{м}^2 \cdot \text{с}$ ) в точке ПРТ\_3 удовлетворительно согласуются со значением  $q_0 = 9.2 \pm 3.1$  МБк/( $\text{м}^2 \cdot \text{с}$ ) 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.

*Известна хорошо выраженная зависимость* ОА Rn в подпочвенном воздухе от атмосферного давления и температуры. При анализе временных рядов ОА Rn с целью выделения в динамике Rn аномалий, предвещающих землетрясения, выполнялись их барокомпенсация на флуктуации атмосферного давления по методике А.А. Любушина и фильтрация колебаний, обусловленных суточным ходом температуры. При анализе длительных рядов данных вычиталась сезонная компонента по аддитивной модели. В первую очередь исследовались синфазные вариации ОА Rn на двух или более пунктах регистрации.

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. Исследовались такие параметров аномалий, как относительная амплитуда  $\delta = ((A_{ан} - A_{фон}) / A_{фон}) \cdot 100$ ,  $t_{упр}$  – время упреждения,  $t_{ан}$  – длительность аномалии.

**В третьей главе** приводятся результаты работ по исследованию отклика поля подпочвенного Rn на сильные землетрясения региона.

*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. Предвещающие аномалии в поле подпочвенного Rn были выявлены для 8 событий. При этом в случае роевых и форшок-афтершоковых последовательностей рассматривалось землетрясение с максимальной магнитудой.

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. Выделенные типы аномалий соответствуют данным из литературных источников. Амплитуда аномальных возмущений, предвещающих землетрясения, в поле подпочвенного Rn находится в диапазоне  $\delta = 18–500\%$ , что нередко, меньше амплитуд помех, достигающих 300% и связанных с воздействием метеорологических величин.

Поэтому крайне важным для экспертной оценки и выделения аномалий ОА Rn, 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 предвещались аномалиями и, соответственно, прогнозными заключениями.

В четырех случаях выделения фазовой корреляции на трех-пяти пунктах предвещающих землетрясения аномалий оценивались диапазоны относительных сдвигов их вступлений с учетом накопленного эмпирического опыта, а так же кросскорреляцией рядов. По диапазону разности моментов прихода выделенных вступлений оценивался сектор, центральная линия которого принималась азимутом на источник возмущения. При допущении плоского фронта распространения возмущения рассчитывалась его кажущаяся скорость ( $v_{\text{КАЖ}}$ ), которая для землетрясений района Авачинского залива находится в диапазоне 14–144 км/сутки, что вероятно, связано с глубинами, на которых происходят генерирующие эти возмущения процессы в сейсмофокальной зоне на последней стадии подготовки соответствующих землетрясений [Фирстов и др., 2011; Фирстов и др., 2013].

Экспериментальные данные и рассчитанные для ряда случаев азимуты, удовлетворительно совпадающие с направлением на эпицентр землетрясения, указывают на возможную причину появления синфазных аномалий на сети пунктов подпочвенного Rn, связанную с прохождением по земной среде сигналов типа уединенных деформационных волн, возникающих за счет квазивязкого течения геоматериала на последней стадии подготовки землетрясения в области готовящегося очага. В пользу предположения о существовании таких волн свидетельствует зарегистрированное наклономерной станцией перед землетрясением 15 октября 2012 г. с  $M = 5.6$  бухтообразное возмущение, совпадающее по времени с аномалиями подпочвенного Rn на сети пунктов [Фирстов, и др., 2013; Макаров, Сероветников, 2014]. Подобная картина наблюдалась перед землетрясением Идзу-Осима (Япония) 14.01.1978 г.,  $M = 7.0$  [Wakita, 1981]. Экспериментальные данные

дают возможность предположить, что деформации, зарегистрированные наклономером, нашли отклик в динамике подпочвенного Rn и оба метода зарегистрировали возмущение типа уединенной волны длительностью около 4 суток, возникшее на последней стадии подготовки землетрясения 15.10.2012 г.

*Кроме землетрясений с глубиной очага до 90 км*, впервые в мировой практике радоновых исследований зарегистрированы предвестниковые аномалии перед глубоким землетрясением ( $M = 7.2$ ,  $H = 177$  км), позволившие дать его прогноз [Фирстов и др., 2017].

Перед этим землетрясением, названным Жупановским (ЖЗ), произошедшим под восточным побережьем Камчатки 30.01.2016 г., в ОА Rn были зарегистрированы бухтообразные отрицательные возмущения с  $\delta = 17\text{--}80\%$ , которые синфазно проявились также в концентрации  $H_2$  (рисунок 3). Отрицательные предвестниковые аномалии землетрясений в поле подпочвенного Rn отмечаются крайне редко, что характеризует этот случай как уникальный. С использованием данных ОА Rn трех пунктов, образующих треугольник с апертурой  $\sim 40$  км, рассчитан азимут на источник предваряющего ЖЗ возмущения, который составил  $\alpha = 358^\circ$  и отличается от азимута на эпицентр по NEIC на  $14^\circ$ .

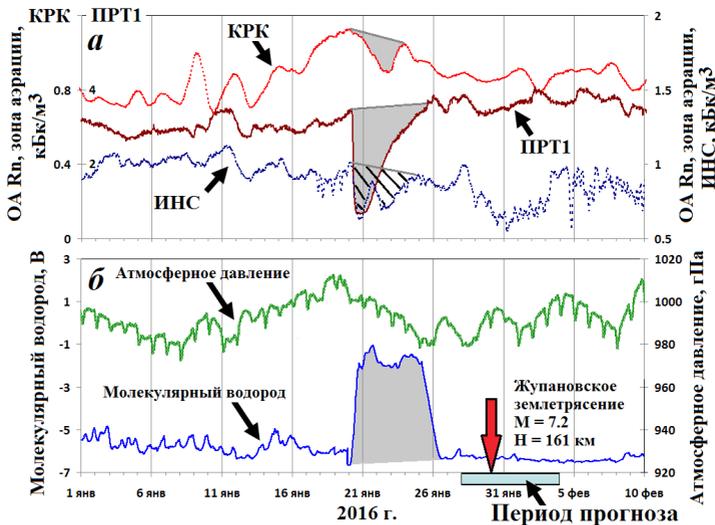


Рисунок 3 – Осредненные скользящим средним в 2.5-часовом окне кривые ОА Rn в зоне аэрации в различных пунктах (а); атмосферное давление, концентрация  $H_2$  в пункте ИНС (б) за период 01.01–10.02.2016 г. Предвестниковые аномалии выделены серым фоном и штриховкой [Фирстов, Макаров, Глухова, 2017].

Диапазон кажущейся скорости распространения деформационной волны составил  $v_{\text{КАЖ}} = 250\text{--}270$  км/сутки, что значительно больше относительно полученных результатов для землетрясений с меньшей глубиной очага, и, вероятно, указывает на ее более глубокий источник. После ЖЗ в динамике ОА Rn наблюдались аномальные возмущения, вероятно, являющиеся пост-сейсмическим эффектом, причиной которого стали значительные сотрясения грунта и вертикальные деформации.

***В поле подпочвенного Rn и  $H_2$  на Петропавловске-Камчатском геодинамическом полигоне*** также зарегистрированы возмущения, которые могут являться «удаленными» предвестниками землетрясений с  $M > 7.5$  на расстояниях от очагов 800–2000 км.

Перед Симуширским землетрясением с  $M = 8.3$ , произошедшем в районе средних Курильских островов 15.11.2006 г., в пунктах сети со временем упреждения от двух до пяти суток наблюдались аномалии концентрации  $H_2$  и ОА Rn с относительной амплитудой до 150 % [Широков и др., 2014]. 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.

Перед мегаземлетрясением Тохоку (расстояние 2100 км от очага до пункта ПРТ) обнаружена краткосрочная предвещающая аномалия за 42 суток в концентрации Rn и за 28 суток в концентрации  $H_2$  [Макаров и др., 2012; Широков и др., 2014]. Перед этим землетрясением на Петропавловске-Камчатском геодинамическом полигоне так же наблюдались предвещающие аномалии в ряде других геофизических параметров.

***Перед цепочкой сильных землетрясений*** северо-западной окраины Тихого океана и мегаземлетрясением Тохоку наблюдались аномалии длительностью от одного года до трех лет в виде повышения (в форме тренда) и последующего бухтообразного снижения концентрации подпочвенного Rn в пункте ПРТ в зоне влагонасыщения (ЗВ).

Непрерывный временной ряд ОА Rn за 15-летний период подвергался барокомпенсации и усреднению в полусуточном окне, а затем сглаживанию скользящим средним по пяти точкам для фильтрации «высокочастотной» составляющей и вычиталась сезонная компонента по аддитивной модели [Фирстов и др., 2015]. Полученная кривая ОА Rn сопоставлялась с наиболее сильными землетрясениями, произошедшими за период 1.10.2000 г. – 01.03.2017 г. (рисунок 4).

В период апрель 2006 г. – январь 2007 г. произошло три события (Олюторское и два Симуширских) с  $M > 7.5$ , а за 2.5 года перед ними возник тренд возрастания ОА Rn (рисунок 4). Непосредственно перед Олюторским землетрясением тренд сменился резким бухтообразным падением значений ОА Rn на ~30 % в течение трех месяцев. Низкий уровень сохранялся около полутора лет.

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 4). Новая тенденция к увеличению ОА Rn началась с января 2012 г. и сменилась резким бухтообразным падением значений ОА Rn на ~30 % в середине 2015 г. 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.

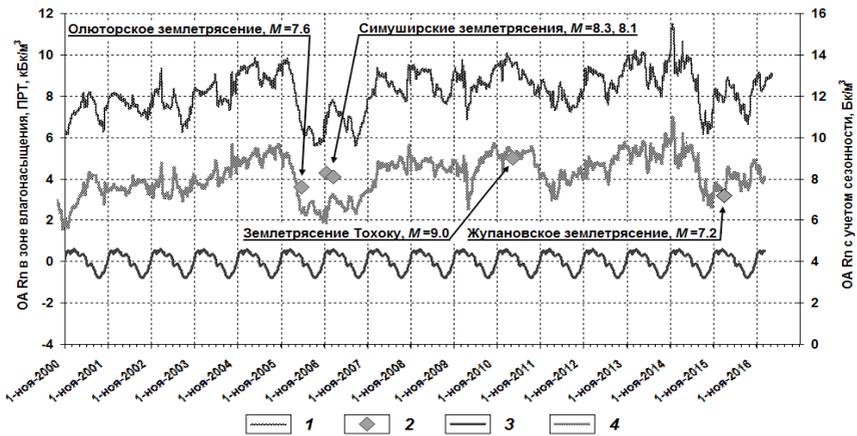


Рисунок 4 – Временной ряд ОА Rn в зоне влагонасыщения в опорном пункте ПРТ: 1 – средненные данные ОА Rn, 2 – землетрясения северо-западной окраины Тихого океана с  $M > 7.5$  и ЖЗ с  $M = 7.2$ , 3 – аддитивная сезонная модель, 4 – кривая ОА Rn за вычетом сезонной составляющей [Фирстов и др., 2015].

Пункт ПРТ находится в зоне динамического влияния разлома (ЗДВР), границы которой хорошо выделяются по геофизическим данным. Эта зона может рассматриваться как флюидонасыщенный коллектор, являющийся местом разгрузки подземных водоносных горизонтов, в котором основной поток Rn поступает в рыхлые отложения из более глубоких слоев за счет всплытия микропузырьков. Гидрологические особенности района пункта ПРТ дают основания полагать, что поток Rn к дневной поверхности формируется под действием напряженно-деформированного состояния блока геосреды большого объема, включающего большую часть Паратунского геотермального месторождения. По-видимому, длительные тренды ОА Rn связаны с длиннопериодными вариациями ППР в результате изменений регионального поля напряжений.

**В четвертой главе** рассмотрены особенности и закономерности возникновения радоновых предвестников землетрясений на Камчатке в сопоставлении с известными литературными данными.

**Предвестниковые аномалии при подготовке землетрясения** могут опосредованно проявляться в различных геофизических полях, в том числе и в поле подпочвенного и растворенного в подземных водах Rn. Из сводки предвестников землетрясений [Cicerone et al., 2009] были выбраны 67 радоновых и добавлены предвестниковые аномалии, зарегистрированные на Петропавловске-Камчатском геодинамическом полигоне за период 1997-2015 гг. Был выполнен сравнительный анализ параметров радоновых предвестников ( $\delta$ ,  $t_{\text{тип}}$ ,  $t_{\text{ан}}$ ) с теоретическими и эмпирическими зависимостями их от магнитуды и расстояния до эпицентра из работ [Добровольский, 1991],  $R = 10^{0.43M}$ , и [Сидорин, 1992],  $R = 10^{0.48M}$ . На основании выполненного сравнительного анализа можно предположить, что камчатские предвестниковые аномалии подпочвенного Rn могут иметь деформационную природу.

**Существует достаточно много моделей миграции Rn к поверхности**, разработанных с определенными допущениями для ряда случаев известных физико-литологических условий. Это модели формирования радоновых предвестников на основе механических представлений (деформации, способствующие выжиманию Rn из кристаллической решетки и увеличению коэффициента эманирования Rn из горных пород в поровые флюиды; подмешивание флюидов в подземные воды из других горизонтов; ультразвуковые колебания, способствующие выделению Rn из кристаллической решетки; вариации скорости вертикального газового потока за счет изменения трещиноватости и пористости пород под действием тектонических напряжений. Модель гидротермальной системы как резонатора с собственной частотой колебаний концентрации газов. Физико-химическая модель периодического фракционирования примесных газов в газовых коллекторах в зоне фазового расслоения гидротермального раствора. Модель «геогаза», в которой поток газов в форме микропузырьков является основным механизмом транспортировки Rn к дневной поверхности в грунте с полным влагонасыщением.

За время существования пунктов мониторинга подпочвенных газов были зарегистрированы три предвестниковые аномалии концентрации Rn (две в пункте ПРТ и одна в пункте ИНС), по морфологическим признакам относящихся к бухтообразным, но с определенной, общей для них, особенностью формы записи, которые в первом приближении, можно описать математической моделью распространения Rn в потоке воды, предложенной в работе [Гудзенко, Дубинчук, 1987].

Исходя из георадарных исследований пункта ПРТ предполагается, что в породах ниже уровня грунтовых вод, преобладает 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 выделяется участок разуплотнения, над которым установлен датчик, зарегистрировавший аномалию. Здесь можно предположить наличие вертикального водного потока с последующим стоком в ручей, расположенный в 50 м от ПРТ. 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.

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 общем, задача сводится к поиску зависимости приращения концентрации Rn ( $\Delta C$ ) от времени в условиях воздействия импульса напряжений разных форм:

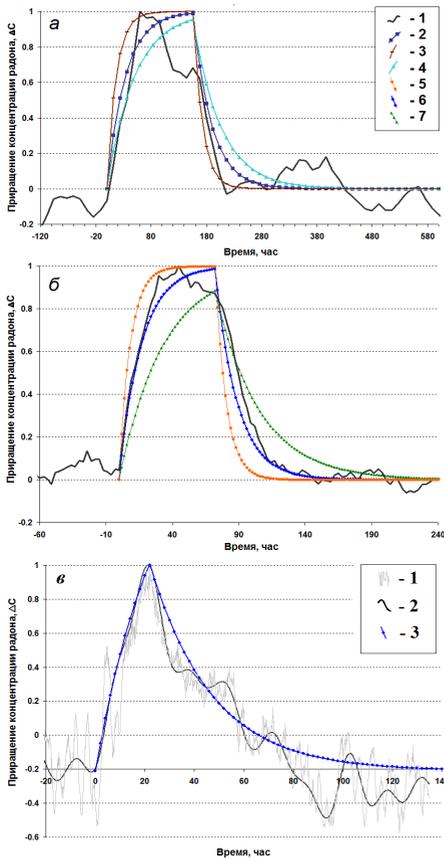
$$\begin{aligned} \Delta C(t) &= 0, t \leq 0 \\ \Delta C(t) &= \Delta C_{\max} (1 - e^{-\Lambda t}), 0 < t < t_s, \\ \Delta C(t) &= \Delta C_{\max} (1 - e^{-\Lambda t_s}) e^{-\Lambda(t-t_s)}, t \geq t_s \end{aligned} \quad (4)$$

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 гидрогеологической системы,  $Q$  – расход потока в системе,  $V$  – водообменный объем системы;  $\lambda_p$  – постоянная распада Rn.

С использованием решения задачи математической модели переноса Rn в водной среде с полным поперечным перемешиванием рассчитывались кривые для зарегистрированных в ПРТ и ИНС аномалий. Методом подбора получено наилучшее совпадение расчетных и экспериментальной кривых [Фирстов, Макаров, 2015; Фирстов и др., 2015] (рисунок 5).

Хотя вертикальное движение подземных вод по дизъюнктивным зонам, в отличие от горизонтального случая, полностью не может удовле-

творять условиям модели, но на качественном уровне рассмотренная модель применима 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 трое суток, а в третьем около одних суток. В первом случае, по-видимому, импульс напряжения был двухтактный, но для упрощения задачи рассматривался равномерный прямоугольный импульс с максимальной амплитудой из двух. 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 5).

Рисунок 5 – 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 5.12.1997 г. с  $M = 7.7$ ; *б* – землетрясение Авачинского залива 19.02.2015 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 –  $\Lambda = 0.03 \text{ [с}^{-1}\text{]}$ .

Кривая теоретического отклика (*в*), иллюстрирующая приращение концентрации Rn при  $\Lambda = 0.04 \text{ с}^{-1}$ : экспериментальная кривая перед землетрясением 20.03.2016 г. с  $M = 6.4$  (1), экспериментальная кривая после фильтрации (2), теоретическая кривая (3). Кривые нормированы на максимум.

Если пренебречь постоянной, характеризующей абсорбцию на стенках капилляров  $\lambda_a$ , и учесть, что постоянная распада Rn  $\lambda_p = 2.1 \cdot 10^{-6} \text{ с}^{-1}$ , 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.

## ЗАКЛЮЧЕНИЕ

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. В настоящее время сеть пунктов, существующая почти 20 лет, оснащена современными аппаратно-программными средствами для сбора, обработки и хранения получаемых временных рядов с передачей данных близко к реальному времени. Все пункты сети оснащены аппаратными комплексами РКПГ, разработанными и созданными при участии автора. В диссертации приведено описание и данные апробации разработанного простого и оперативного способа оценки плотности потока Rn с поверхности при его пассивной регистрации в накопительной камере для определения чувствительности конкретной точки наблюдений.

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 предвещающие 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 Rn, связанную с прохождением по земной среде сигналов типа уединенных деформационных волн. Подобные волны, предположительно, возникают за счет квазивязкого течения геоматериала на последней стадии подготовки землетрясения в области готовящегося очага и воздействуют на эманурующий горизонт в пунктах регистрации, изменяя величину ОА Rn в зоне аэрации. Их длительность по данным сети пунктов составляет от полутора до нескольких десятков суток и время упреждения от 0.5 до 80 суток. Кажущаяся скорость их распространения составляет 14–144 км/сут. Так же обнаружены краткосрочные, от полутора до сорока суток, удаленные предвестники в динамике подпочвенного Rn 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 предвещающих аномалий в поле подпочвенного  $Rn$ , 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.

Выявлены предвещающие 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 о возможном механизме их генерации, обусловленном изменением потока  $Rn$  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 и получены определенные указания на возможную деформационную природу радоновых предвестников, сделан вывод о существовании нескольких возможных моделей их возникновения.

В поле подпочвенного  $Rn$  на Петропавловск-Камчатском геодинамическом полигоне регистрировались аномалии  $OA Rn$ , по форме записи позволяющие рассматривать их механизм возникновения с использованием теоретической модели переноса  $Rn$  в водной среде с полным поперечным перемешиванием. На основании этой модели 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.

## ОСНОВНЫЕ ПУБЛИКАЦИИ ПО ТЕМЕ ДИССЕРТАЦИИ

1. **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.
2. 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. – 2017. – Т. 472, № 4. – С. 462–465.

3. 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. – № 5. – С. 43–49.
4. Фирстов, П.П. Применение методики айгеноскопии для поиска предвестников сильных землетрясений в поле почвенного радона (<sup>222</sup>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.
5. 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.
6. 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.
7. 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.
8. 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. – 2017. – Т. 53, № 2. – С. 5–22.

#### ПУБЛИКАЦИИ В ДРУГИХ ИЗДАНИЯХ

1. 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 (АНРИ). – 2016. – № 4 (87). – С. 55–62.
2. Паровик, Р.И. Математическое моделирование объемной активности радона с целью изучения сейсмической активности Южной Камчатки / Р.И. Паровик, П.П. Фирстов, **Е.О. Макаров** // Доклады АМАН. Адыгская (Черкесская) международная академия наук. – 2012. – Т. 14, № 2. – С. 60–67.

Подписано в печать: 28.07.2017 г.  
Усл. печ. лист. 1,28. Уч.-изд. лист. 1,29.  
Формат 60×84/16. Бумага «Mondi».  
Тираж 100 экз. Заказ № 7853.

Печать цифровая.

---

Отпечатано в ФГБУН Институт морской геологии и геофизики  
Дальневосточного отделения РАН  
693022, г. Южно-Сахалинск, ул. Науки, 1Б  
Офсетный цех