

Отзыв на автореферат диссертации Макарова Евгения Олеговича «Отклик в динамике подпочвенного радона на подготовку сильных землетрясений Камчатки и северо-западной окраины Тихого океана», представленной на соискание ученой степени канд. физ.-мат. наук по специальности 25.00.10 – Геофизика, геофизические методы поисков полезных ископаемых»

Работа выполнена в Федеральном государственном бюджетном учреждении науки Камчатском филиале Федерального исследовательского центра «Единая геофизическая служба РАН»

**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 с использованием данных 20-летних наблюдений, проводимых в районе Южной Камчатки. Для решения этих проблем была разработана методика регистрации и мониторинга подпочвенных газов на основе использования модернизированной сети пунктов Петропавловска-Камчатского геодинамического полигона с учетом влияния на объемную активность радона метеорологических факторов. На этой основе изучен отклик в динамике подпочвенного радона на геодинамические процессы Курило-Камчатского региона и предложены способы выявления предвестниковых аномалий сильных землетрясений. Рассматривались также математические модели, описывающие механизмы возникновения предвестников сильных землетрясений и исследовались зависимости параметров предвестников землетрясений от магнитуды сейсмических событий. В результате этого подхода появилась возможность более детальной диагностики выявления предвестниковых аномалий сильных землетрясений.

**Актуальность и прикладная значимость проведенных работ.** Отметим, что для Камчатского участка зоны субдукции по данным 19-летних наблюдений выявлены предвестники землетрясений с магнитудами более 5.5 и глубиной очага менее 90 км. Однако, аномалии наблюдались и перед отдельными сильными событиями северо-западной части Тихоокеанской зоны, в частности перед Симуширским (Курильские о-ва) землетрясением 15.11.2006 г.,  $M_w=8.3$  и перед землетрясением Тохоку (Япония) 11.03.2011 г. Время упреждения радоновых аномалий не превышало двух месяцев. Комплексный анализ, проведенный с использованием других геофизических предвестников, в том числе по сейсмологическим данным, позволил в ретроспективном варианте и в реальном времени сделать оперативный прогноз этих землетрясений (Широков, Фирстов, Макаров и др., 2014; Широков, Фирстов, Макаров, 2015) со временем упреждения менее 8 суток с одновременным прогнозом мест ожидаемых событий по наиболее сильным форшокам в зоне консолидации области очага. Таким образом, радоновый мониторинг может рассматриваться как один из эффективных краткосрочных предвестников в комплексе с другими видами наблюдений. Это указывает на важное фундаментальное и прикладное значение работ по радоновому мониторингу с использованием сети из 3-5 пунктов регистрации с апертурой около 50 км.

**Научная новизна.** Впервые на Камчатке по данным 3-5 пунктов регистрации объемной активности радона были диагностированы предвестниковые аномалии в реальном времени для событий на Камчатке с магнитудами более 5.5 и глубиной очага менее 90 км и в одном случае около 180 км. Аномалии зарегистрированы почти одновременно на нескольких пунктах наблюдательной сети, что повышает надежность их выделения. В частности, аномалии были обнаружены и своевременно проинтерпретированы как предвестниковые за двое суток до землетрясения с  $M_w = 7.2$  с глубиной очага  $H = 177$  км, возникшим на эпицентральной расстоянии около 100-120 км от пунктов сети мониторинга. В данном случае прогноз оправдался по времени и магнитуде.

**На защиту соискателем вынесены 4 положения, касающиеся фундаментальных и прикладных аспектов проведенных исследований.** Все положения являются научно обоснованными и поэтому не вызывают сомнений. Существенным является вклад соискателя в модернизацию сети наблюдений радонового мониторинга и в обоснование теоретической модели переноса радона в водной среде для объяснения возникновения радоновых аномалий определенного вида.

**Практическая значимость работы** состоит в том, что исследование связи динамики подпочвенного  $R_n$  с сейсмичностью имеет важное значение для понимания физики процесса подготовки сильных землетрясений и разработки методов их краткосрочного прогноза. Практическая значимость работы заключается в повышении степени надежности обобщенных по разным видам предвестников оперативных оценок сейсмической опасности и возможности своевременного информирования органов власти Камчатского края при комплексном использовании разных видов мониторинга. В реальном времени подаются еженедельные заключения о сейсмической опасности в Камчатский филиал Российского экспертного Совета по прогнозу землетрясений, оценке сейсмической опасности и риска.

**Тематика выполненных исследований соответствует приоритетным направлениям фундаментальных исследований в области наук о Земле.** Эти направления представлены в Постановлениях Президиума РАН № 233 от 01.07.2003 г. в части исследований физических полей Земли, а также современной геодинамики, сейсмичности и сейсмического прогноза, в Программе фундаментальных научных исследований государственных академий наук на 2008–2012 годы по направлению, связанному с катастрофическими процессами природного и техногенного происхождения, изучением сейсмичности и прогноза, с разработкой принципов и параметризации природных опасностей, методов комплексного мониторинга природных опасностей с прогнозами времени и магнитуды ожидаемых разрушительных землетрясений с целью их использования органами исполнительной власти для снижения сейсмического риска и уменьшения ущерба. В принятой Программе фундаментальных научных исследований государственных академий наук на 2013–2020 годы сделан акцент на выяснение механизмов преобразования и взаимодействия физических полей Земли на границе земная кора-атмосфера, на оценках корреляционных связей вариаций геофизических полей с барическими вариациями в атмосфере с целью организации систем мониторинга предвестников землетрясений, в том числе радонового мониторинга в сейсмоактивных регионах.

**Публикации.** По теме диссертационной работы опубликовано 27 статей, в том числе 8 статей в ведущих научных рецензируемых журналах, входящих в перечень ВАК.

**В работе представлен обширный обзор отечественных и зарубежных авторов.** На основе обзорных работ собраны и систематизированы многочисленные данные о радоновых предвестниках, выделены их типы с различными временами упреждения (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 в диапазоне магнитуд  $M = 4-9$  и возникают при деформациях  $10^{-6}-10^{-8}$ , связанных с изменениями тензочувствительности и напряженно-деформированного состояния геологической среды в пункте наблюдения. Показано, что относительные изменения концентрации  $R_n$  чаще всего находятся в пределах 20–200 % относительно фона, но в ряде случаев отмечены вариации более 1000 %. Сложность поиска предвестников землетрясений в поле подпочвенного  $R_n$  состоит в том, что из всего многообразия факторов, влияющих на его динамику, надо выявить вариации, связанные с изменениями напряженно-деформированного состояния среды.

**Прикладные результаты выполненных работ** по исследованию связи динамики подпочвенного  $R_n$  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  $R_n$ . В четырех случаях обнаружено, что между временами появления аномалий на 3-5 пунктах имеются характерные относительные сдвиги. Обнаружены краткосрочные, от полутора до сорока суток, удаленные предвестники в динамике подпочвенного  $R_n$  перед Симуширским землетрясением 15.11.2006 г., с  $M=8.3$  и землетрясением Тохоку с  $M=9.0$ . Впервые в мировой практике радоновых исследований на основании оперативно зарегистрированных предваряющих аномалий в поле подпочвенного  $R_n$ , а также в концентрациях молекулярного водорода и двуокиси углерода, был дан оправдавшийся по времени и магнитуде заблаговременный краткосрочный прогноз внелитосферного землетрясения с  $H=177$  км и  $M=7.2$ . Выявлены предвестниковые аномалии длительностью от одного года до трех лет в виде повышения в форме тренда и последующего бухтообразного снижения концентрации подпочвенного  $R_n$  перед некоторыми землетрясениями с  $M > 7.5$  северо-западной окраины Тихого океана и сделан вывод о 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 заключительной части отзыва рецензент отмечает, что автореферат в необходимой степени раскрывает содержание проведенных исследований и их результаты. Основные положения работы соискатель опубликовал в ведущих научных изданиях. Представленная работа является актуальной, содержит научную новизну, имеет как фундаментальное, так и прикладное значение. Представленная работа соответствует специальности 25.00.10 – Геофизика, геофизические методы поисков полезных ископаемых. По форме и содержанию автореферат соответствует требованиям ВАК.

По нашему мнению, соискатель Макаров Евгений Олегович заслуживает присуждения искомой степени канд. физ.-мат. наук по специальности 25.00.10 – Геофизика, геофизические методы поисков полезных ископаемых.

Вед. научный сотрудник Федерального государственного бюджетного учреждения науки Камчатского филиала Федерального исследовательского центра «Единая геофизическая служба РАН», канд. физ.-мат наук (683 023, г. Петропавловск-Камчатский, булл. Пийпа, 9, к. 323. [shir@emsd.ru](mailto:shir@emsd.ru). Тлф. 8 924 891 5573).

Согласен на включение своих персональных данных в документы, связанные с работой Диссертационного Совета и их дальнейшую обработку.

В.А.Широков

