

На правах рукописи



Бирюлин Сергей Викторович

**ПРОСТРАНСТВЕННО-ВРЕМЕННЫЕ ЗАКОНОМЕРНОСТИ
ПРОЯВЛЕНИЯ АНОМАЛИЙ ОБЪЁМНОЙ АКТИВНОСТИ РАДОНА
ПЕРЕД ТЕКТОНИЧЕСКИМИ ЗЕМЛЕТРЯСЕНИЯМИ В РАЙОНЕ
ЮЖНЫХ КУРИЛ**

Специальность 25.00.10 – геофизика,
геофизические методы поисков полезных ископаемых

АВТОРЕФЕРАТ

диссертации на соискание ученой степени
кандидата геолого-минералогических наук

Екатеринбург – 2022

Работа выполнена в Федеральном государственном бюджетном учреждении науки Институт геофизики им. Ю.П. Булашевича Уральского отделения Российской академии наук.

Научный руководитель:

Юрков Анатолий Константинович, кандидат геолого-минералогических наук, Федеральное государственное бюджетное учреждение науки Институт геофизики им. Ю.П. Булашевича Уральского отделения Российской академии наук, г. Екатеринбург, заведующий лабораторией геодинамики.

Официальные оппоненты:

Писецкий Владимир Борисович, доктор геолого-минералогических наук, профессор, заведующий кафедрой геоинформатики Уральского государственного горного университета, г. Екатеринбург;

Семинский Александр Константинович, кандидат геолого-минералогических наук, младший научный сотрудник Института земной коры Сибирского отделения Российской академии наук, г. Иркутск.

Ведущая организация:

Камчатский филиал Федерального государственного бюджетного учреждения науки Федерального исследовательского центра «Единая геофизическая служба Российской академии наук», г. Петропавловск-Камчатский

Защита состоится «14» сентября 2022 года в 14-00 часов на заседании диссертационного совета Д.003.022.03 при Институте земной коры Сибирского отделения Российской академии наук (ИЗК СО РАН) по адресу: 664033, г. Иркутск, ул. Лермонтова, д. 128.

С диссертацией можно ознакомиться в научной библиотеке ФГБУН ИЗК СО РАН и на сайте: <http://crust.irk.ru/images/upload/newsfull216/3172.pdf>

Отзывы на автореферат в двух экземплярах с подписью, заверенной печатью учреждения, просим направлять учёному секретарю совета, кандидату физико-математических наук Добрыниной Анне Александровне по вышеуказанному адресу или e-mail: dobrynina@crust.irk.ru. Тел: 8(3952)426900.

Автореферат разослан «17» мая 2022 г.

Учёный секретарь
диссертационного совета Д 003.022.03
кандидат физико-математических наук



А.А. Добрынина

ВВЕДЕНИЕ

Актуальность работы. Землетрясения – это явления, представляющие опасность для человека, инженерных сооружений и инфраструктуры. Минимизация рисков сейсмических событий является проблемой как в глобальном, так и локальном масштабах. Они оказывают существенное негативное влияние на социальное развитие и экономику. По данным геологической службы США за период с 2000 по 2018 гг. во всём мире в результате землетрясений погибло свыше 800 000 человек. Поэтому исследования, направленные на поиск и разработку методов предупреждения подобных явлений, на снижение их последствий, представляются чрезвычайно важными.

Несмотря на широкий спектр мнений о возможности прогнозирования землетрясений, в мире не прекращаются работы по поиску решения данной проблемы. Из большого количества существующих различных методов, в той или иной степени применяемых для прогнозирования процесса подготовки тектонических землетрясений, широко используются немногие из них, имеющие физическое обоснование и возможность практической реализации. К их числу относится и применение вариаций изотопов радона, в основном радона-222.

Радон (Rn-222) образуется при радиоактивном распаде Ra-226 в ряду U-238 в земной коре. Поскольку радон является радиоактивным газом, организация его инструментальных измерений относительно простая и недорогая. Небольшим периодом полураспада Rn-222 (3.82 дня) обусловлено отсутствие кумулятивного эффекта, поэтому краткосрочные изменения его концентрации в земле могут контролироваться с очень хорошим временным разрешением. Rn-222 непрерывно генерируется в горных породах в процессе распада радия и уверенно регистрируется даже при небольших содержаниях. Его перенос в земной коре регулируется пористостью и проницаемостью горных пород, а также зависит от гидрометеорологических условий. Вариации напряженно-деформированного состояния верхней части земной коры приводят к изменениям объемной активности почвенного радона.

За последние тридцать лет исследованием аномальных изменений концентраций Rn занимался ряд авторов, специализирующихся на измерениях радона в почвенном газе, среди которых можно отметить: King C.Y., Kuo T., Mogro-Campero A., Fleischer R.L., Planinic J., Ramola R.C., Singh S., Virk H.S., Reddy D.V., Walia V., Zmazek B., Martinelli G., в грунтовых водах исследования радона проводили Favara R., Gregoric A., Vaupotic J., Heinicke J., в приземной атмосфере Albarello D.; Oh Y., Kim G., Omori Y., Yasuoka H., Nagahama Y. Радон в качестве индикатора изменений напряженного состояния горных пород, приводящих к тектоническим землетрясениям широко применялся и применяется во всем мире многими исследователями, в том числе: Уткиным В.И., Юрковым А.К., Фирстовым П.П., Макаровым Е. О., Aumento F.; Chang W., Lin Y.-Y., Dubinchuk V. T., Hatuda Z., Kasahara K., King C.Y., Igarashi G., Saito H., Wakita H., Teng T.

Однако результаты проведенных исследований не во всех случаях однозначны и не всегда четко позиционируют радон, как вероятный

предвестник тектонического землетрясения. Это объясняется использованием разной аппаратуры, методик и способов, различными условиями измерений.

В ходе исследований за последние тридцать лет были получены результаты, показывающие различную связь сейсмических событий и изменений объёмной активности радона (ОАР) в зависимости от расстояния до эпицентра. Например, в 2011 году Oh Y. и Kim G. фиксировали аномалии ОАР перед землетрясением Тохоку в корейской пещере Сонгрю на расстоянии более 1200 км до эпицентра. Уверенные результаты аномального поведения ОАР отражались на станциях мониторинга перед землетрясением М 6.3 в итальянском городе Л'Акуила, 2009 год, на расстоянии первых десятков километров от эпицентра. Также различные результаты наблюдались и по времени проявления радоновых аномалий, предшествовавших тектоническим землетрясениям. Перед землетрясением Тохоку аномалии ОАР наблюдались за несколько недель, а перед сейсмическим событием в Л'Акуиле за сутки.

С одной стороны, приведённые примеры показывают, что проявление сейсмического события в кривых ОАР зависит от геологических и геодинамических условий конкретного региона. А с другой, существенную роль, при интерпретации полученных результатов, играют применяемая методика измерений и аппаратура.

Для ясного понимания результатов ранее выполненных исследований, получения статистически значимых пространственных и временных закономерностей поведения ОАР перед землетрясениями, необходимо провести анализ результатов длительных мониторинговых наблюдений ОАР в сейсмоактивном районе с известными геолого-тектоническими условиями. В качестве исследуемого района были выбраны Южно-Курильские острова. На существующих геофизических стационарах Института морской геологии и геофизики ДВО РАН и с помощью его сотрудников организованы станции радонового и температурного мониторинга на островах Кунашир, Итуруп и Шикотан. Данные со станций передавались в Институт геофизики УрО РАН с 2007 года.

Степень разработанности. Разработана методика мониторинговых наблюдений аномалий радона с применением адвективного режима доставки почвенного воздуха к детектору. Проведен мониторинг ОАР на двух станциях, расположенных в Южно-Курильском регионе в период с 2011 по 2018 гг. На основании полученных экспериментальных данных и с учетом результатов ранее выполненных работ, в том числе по применению радона для изучения горных ударов в горных выработках, проведён ретроспективный сопоставительный анализ аномалий ОАР с тектоническими землетрясениями. Определены основные временные и пространственные закономерности отражения сейсмических событий в кривых объёмной активности радона. Выполнен анализ азимутального распределения землетрясений, отразившихся в кривых объёмной активности радона.

Цели и задачи работы. Цель исследования – выявление пространственно-временных закономерностей и связей между сейсмической активностью и предшествующими аномалиями объёмной активности радона (ОАР), выделенных на основе данных анализа данных полученных на станциях

мониторинга, располагающихся на территории Южно-Курильского геодинамического полигона.

Задачи:

- разработка методики выделения аномалий радона и обработки результатов мониторинга ОАР с учетом геодинамических условий Южно-Курильского полигона

- выполнение ретроспективного статистического анализа аномалий радона, полученных с 2011 по 2018 гг. и сопоставление их с тектоническими событиями, произошедшими за аналогичный период в выделенной эпицентральной зоне

- поиск и анализ закономерностей между землетрясениями и аномалиями кривых ОАР

- оценка связи времени проявления землетрясений и кривых аномалий ОАР

- оценка связи землетрясений и кривых аномалий ОАР в зависимости от расстояния между станцией мониторинга и эпицентром.

Научная новизна. На основе деформационной модели И.П. Добровольским была выполнена оценка радиуса зоны проявления предвестников, и применён геодинамический критерий (K) ≥ 2.5 : отношение магнитуды землетрясения (M) к логарифму расстояния от станции мониторинга до события (R).

Для интерпретации полученных результатов была разработана методика выделения аномалий. В качестве аномалии рассматривался участок, содержащий от трех последовательных значений ОАР (при четырехчасовых измерениях), не менее чем в два раза превышающих фоновый уровень, фиксируемый перед началом повышения объемной активности радона.

При выполнении данной работы проанализированы результаты измерения объёмной активности радона, полученные с применением адвективного способа доставки радона к детектору, за более чем семилетний период со станций мониторинга на территории Южно-Курильского полигона. Результаты сопоставлены с сейсмическими событиями ($M \geq 4.0$), произошедшими в радиусе 500 км от станции мониторинга Южно-Курильск за соответствующий период. Установлено, что всем 36 рассмотренным землетрясениям, соответствующим геодинамический критерий $K \geq 2.5$ предшествовали аномалии ОАР. То есть геодинамический критерий $K \geq 2.5$ выполняется и для вариаций ОАР. Оказалось, что большое количество землетрясений с $M < 5.6$ на расстоянии < 200 км от станции мониторинга и землетрясений с $M > 6$ на расстоянии от станции мониторинга свыше 200 км не соответствуют критерию ≥ 2.5 , но многим из них предшествовали радоновые аномалии. Так для $K \geq 2.2$ 88 из 90 рассмотренных землетрясений предварялись аномалиями ОАР (97.7%) — почти 100% соответствие. Для получения статистически более обоснованных закономерностей, использовались все выделенные аномалии ОАР, связанные с землетрясениями, которые укладывались в геодинамический критерий $K \geq 2$. По данному критерию 89% (148 из 166) рассмотренных землетрясений отразились в кривых аномалий ОАР.

В рамках выполненного исследования показано, что наиболее предпочтительно при анализе аномалий ОАР использовать критерий $K \geq 2$.

Было установлено, что события происходят только после экстремума аномалии ОАР. Время от экстремума аномалии ОАР до момента землетрясения зависит от расстояния точки наблюдения до эпицентра. Данное обстоятельство позволяет оценивать опасности возможного землетрясения.

Теоретическая и практическая значимость работы. Полученные результаты длительного мониторинга ОАР подтверждают прогностические возможности радона, как предвестника землетрясений. Разработка эффективной методики наблюдения и интерпретации радоновых аномалий в перспективе позволит увеличить вероятность успешного прогноза землетрясений в комплексе с другими методами.

Методология и методы исследования. При исследованиях применялся ряд методов: сравнительный анализ проявления аномалий объёмной активности радона перед землетрясениями; наблюдение влияния различных воздействий на выделение радона из горных пород, в частности одноосного сжатия и упругих колебаний; описание полученных результатов; экспериментальной поиск вероятных механизмов появления радоновых аномалий; мониторинг объёмной активности радона; систематизация полученных данных; статистический анализ выявленных закономерностей.

Основные научные результаты

1. Разработана методика сопоставления радоновых аномалий, полученных с применением адвективного способа доставки почвенного воздуха к детектору, с произошедшими тектоническими землетрясениями в радиусе 500 км от станции мониторинга в Южно-Курильске.

2. Для геолого-тектонических условий Южных Курил, установлено, что тектонические землетрясения, для которых отношение магнитуды к логарифму расстояния до эпицентра больше или равно 2 отмечаются в аномалиях объёмной активности радона (ОАР) после экстремума, что можно рассматривать в качестве прогностического критерия.

3. Для геолого-тектонических условий Южных Курил островов, установлено, что рассмотренные тектонические землетрясения: «ближней зоны» (расстояние от эпицентра до станции мониторинга < 130 км) и «дальней зоны» (расстояние от эпицентра до станции мониторинга > 180 км), отражаются на разных участках аномалии ОАР.

Степень достоверности и апробация работы. Достоверность выполненной работы подтверждается большим объёмом данных, полученных в результате проведения мониторинга, лабораторных и натуральных экспериментов, их соответствием известным теоретическим представлениям, использованием современных методик, аппаратуры и средств, адекватных поставленным целям и задачам.

Основные результаты исследований по теме диссертации докладывались на: конференции IX научные чтения Булашевца. «Глубинное строение, геодинамика, тепловое поле, интерпретация геофизических полей» (г. Екатеринбург, 2017); конференции XIX Уральской молодежной научной школы по геофизике (г. Екатеринбург, 2018); конференции XX Уральской молодежной

научной школы по геофизике (г. Пермь, 2019); III всероссийской научной конференции с международным участием «Геодинамические процессы и природные катастрофы» (г. Южно-Сахалинск, 2019); конференции XI международной школы-семинара «Физические основы прогнозирования разрушения горных пород» (г. Пермь, 2019); VI международной научно-практической конференции «Экологическая геология: теория, практика и региональные проблемы» (г. Севастополь, 2019); конференции XXI Уральской молодежной научной школы по геофизике (г. Екатеринбург, 2020); конференции XI научные чтения Булашевича. «Глубинное строение, геодинамика, тепловое поле, интерпретация геофизических полей» (г. Екатеринбург, 2021).

Личный вклад. Автор активно участвовал в исследовании поведения почвенного радона, в том числе по данным Южно-Курильского геодинамического полигона, начиная с 2015 года. В качестве младшего научного сотрудника лаборатории геодинамики института геофизики им. Ю.П. Булашевича принимал непосредственное участие в экспериментальных исследованиях по изучению влияния упругих колебаний и одноосного сжатия на выделение радона из образцов горных пород. Провел серию экспериментов по изучению изменения проницаемости образцов различных горных пород при циклических изменениях одноосного сжатия. Выполнил экспериментальные исследования по определению коэффициента диффузии R_p в верхнем слое земной коры в случае его адвективно-диффузионного и диффузионного переноса. Разработал методику выделения аномалий радона и обработки результатов мониторинга ОАР с учетом геодинамических условий Южно-Курильского полигона. Выполнил ретроспективный анализ связи аномалий радона, полученных с 2011 по 2018 гг. и сопоставил их с тектоническими событиями, произошедшими за аналогичный период в рассматриваемой зоне. Выделил и проанализировал закономерности отражения землетрясений и возможное влияние вулканических построек на их отражение в полученных кривых объёмной активности радона.

Соответствие диссертации паспорту научной специальности. Диссертационная работа, полученные результаты и публикации соответствуют паспорту специальности 25.00.10 «Геофизика, геофизические методы поисков полезных ископаемых», по пунктам: 14. методы обработки и интерпретации результатов измерения геофизических полей; 22. теоретическое и экспериментальное исследование связей петрофизических и физических свойств горных пород с результатами измерения геофизических полей.

Публикации

По теме диссертации опубликовано 14 работ, в том числе 6 статей, в журналах, входящих в перечень рекомендуемых ВАК.

Объем и структура работы

Диссертационная работа состоит из введения, 4 глав, заключения и списка литературы из 271 наименования. Основное содержание изложено на 137 страницах. В работе 59 рисунков и 4 таблицы.

Благодарности

Автор выражает благодарность за высокопрофессиональное научное руководство при выполнении работы к.г.-м.н. Юркову А.К., за консультации и ценные замечания д.г.-м.н. Демежко Д.Ю., к.г.-м.н. Козловой И.А., д.г.-м.н. Щапову В.А., сотрудникам лаборатории геодинамики Института геофизики УрО РАН за всестороннюю помощь и поддержку при проведении данного исследования.

ГЛАВА 1

Исходя из анализа ранее проведённых исследований по процессу подготовки землетрясений, можно выделить два типа моделей подготовки землетрясений: до 1950-х годов основаны на общей геологии, геофизике и механике земных недр и с конца 1950-х основанные на механике и физике разрушений, многие на базе лабораторных экспериментов. Во многих моделях прослеживаются общие фазы, например, накопление напряжений геологическими блоками, усиленное трещинообразование, выделение энергии, то есть возникновение землетрясения при преодолении сформировавшихся напряжений предела прочности горных пород.

Радон изучается во многих странах мира различными исследователями. Измерения этого газа в почве, грунтовых водах и атмосферном воздухе показали, что пространственные и временные вариации могут предоставить информацию о геодинамических событиях, что представляет интерес при прогнозировании тектонических событий. Ранее учёными из многих стран проводились исследования в наиболее сейсмоактивных регионах мира, с целью выявления связи аномалий радона с землетрясениями. Несмотря на ряд успешных примеров, радон не всегда можно рассматривать в качестве надёжного прогностического критерия. Хотя для этого имеются геологические и физические предпосылки. Поэтому поиск решения вопроса неоднозначности применения радоновых аномалий в качестве прогностического метода землетрясений является основным направлением диссертационной работы.

ГЛАВА 2

Основное условия для изучения и выявления закономерностей любого явления – оно должно происходить и происходить достаточно часто. Исследования по изучению изменения геодинамического состояния перед тектоническими землетрясениями проводились на Южных Курилах. Курилы — это сейсмоактивный регион, где ежегодно происходит большое количество землетрясений. Условия в выбранном районе позволяют технически организовать проведение мониторинговых наблюдений ОАР.

Геолого-тектоническая ситуация на островах Кунашир, Итуруп, Шикотан, где были выполнены радоновые и температурные наблюдения, определяется их принадлежностью к зоне субдукции, подвигающейся Тихоокеанской плиты под Евразийскую плиту (Охотоморскую). Что подтверждается геолого-геофизической характеристикой указанного региона.

ГЛАВА 3

Для мониторинга объемной активности радона использовалась серийно выпускаемая аппаратура РГА-04, SIRAD MR106 и RADEX MR107. Измерения объемной активности радона выполнялись на трёх геофизических стационарах



Рисунок 1 – Схема расположения станций радонового мониторинга.

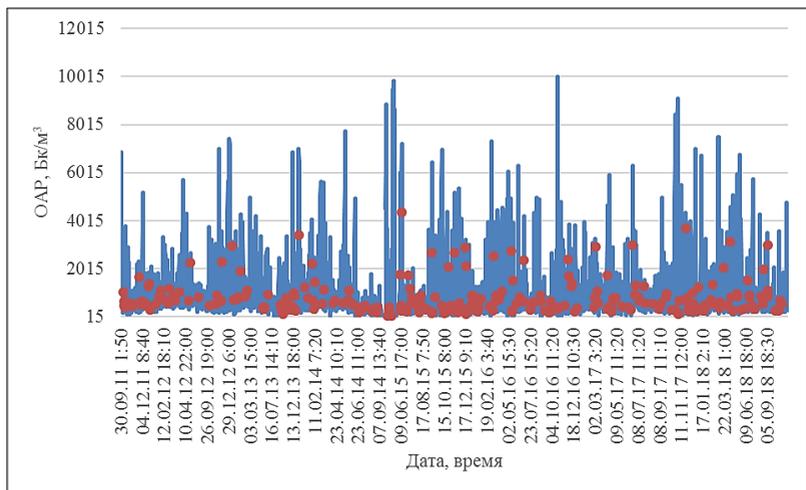


Рисунок 2 – Вариации ОАР и анализируемые землетрясения за весь период наблюдений с 2011 по 2018 гг.

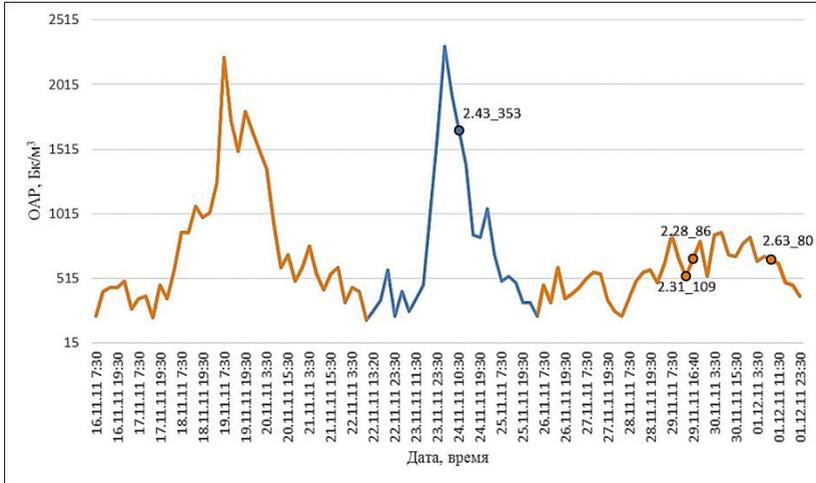


Рисунок 3 – Наблюдаемые значения объёмной активности радона (ОАР) и произошедшие землетрясения (показаны точками). Подписи точек: первое число – отношение магнитуды землетрясения к логарифму расстояния от эпицентра до станции мониторинга; второе число – расстояние от эпицентра до станции мониторинга.

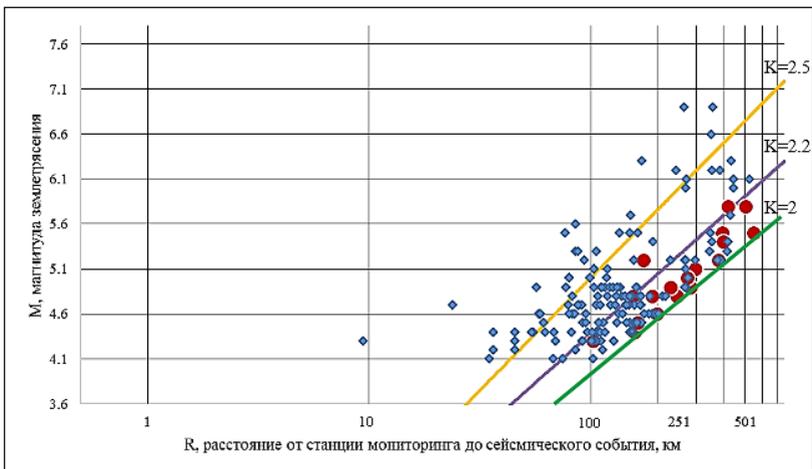


Рисунок 4 – Тектонические землетрясения в поле значений ОАР. Синими ромбами обозначены события, отразившиеся в кривых аномалий ОАР. Красными точками обозначены события, которые не отразились в кривых аномалий ОАР. Жёлтая прямая линия соответствует $K=2.5$; лиловая прямая линия соответствует $K=2.2$, зелёная прямая линия соответствует $K=2$.

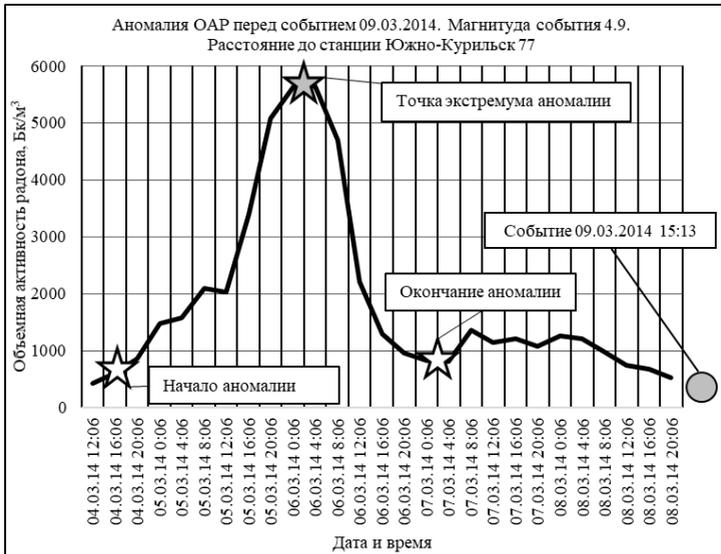


Рисунок 5 – Выбор характерных точек на кривой ОАР.

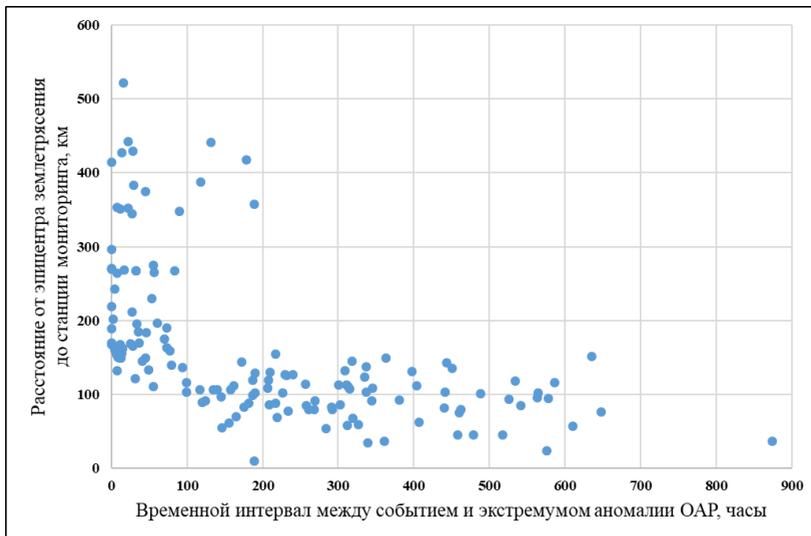


Рисунок 6 – График времени проявления событий с $M/lgR \geq 2$ относительно экстремума предшествующей аномалии.

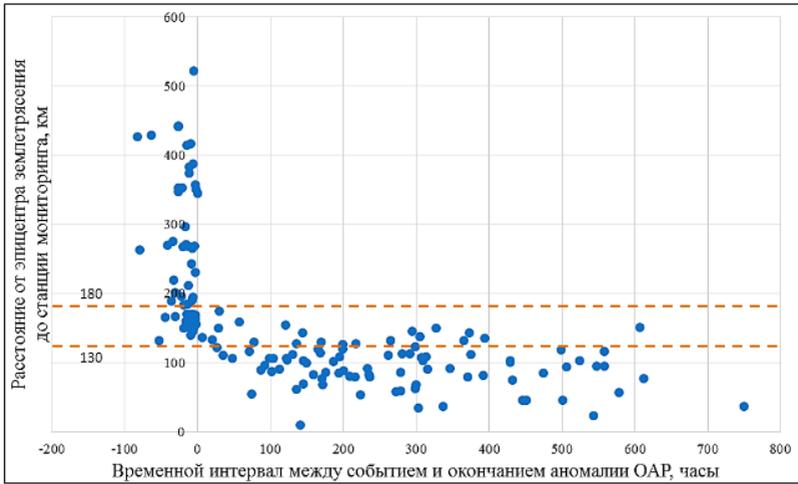


Рисунок 7 — Зависимость расстояния между станцией мониторинга и эпицентра события от интервала между окончанием аномалии района и землетрясением для $M/lgR \geq 2$

ИМГГ ДВО РАН в режиме вынужденной конвекции (адвективный режим). Доставка почвенного воздуха из шпуров глубиной 70-80 см обеспечивалась непрерывно работающим мембранным насосом. Цикл измерения длился четыре часа. Данные записывались и ежемесячно передавались для обработки в Институт геофизики УрО РАН, Екатеринбург. Сейсмические события для ретроспективного анализа брались из сейсмических каталогов USGS (Геологическая служба США).

Для обработки и интерпретации результатов необходимо было ограничить информативную область. В качестве основного принят геодинамический критерий (K) ≥ 2.5 . В период с 2011 по 2018 гг. максимальная магнитуда землетрясений, происходивших в Южно-Курильском регионе, не превышала 7. Поэтому на основе $K \geq 2.5$ радиус исследования ограничен 500 км.

Для дальнейшего анализа выбирались сейсмические события с $M \geq 4.0$ за период с 30.09.2011 по 18.10.2018 в радиусе 500 километров от станции мониторинга ОАР в Южно-Курильске (рисунок 1 на вкладке).

По значениям расстояний до эпицентров рассматриваемых сейсмических событий вычислялось отношение магнитуды к логарифму расстояния. Учитывались только события с соотношением $M/\lg R \geq 2$, в силу того, что механизмы подготовки землетрясений, которым соответствует $K \leq 2$, практически не отмечались в аномалиях ОАР.

В ходе исследования выяснено, что не всегда наблюдаемая аномалия ОАР соответствует процессу подготовки события, которое следует непосредственно после аномалии. Методика сопоставления аномалий ОАР и землетрясений вырабатывалась и уточнялась на основе анализа всех полученных данных. Один из принципов методики основывался на том, что события, отнесённые к ближней зоне происходили после выхода аномалии на фоновый уровень.

Как показали выполненные исследования, продолжительность аномалий перед землетрясениями не превышает нескольких суток, что определяет анализируемый промежуток времени мониторинговых наблюдений. Рассматривать длительные интервалы времени наблюдений нецелесообразно, так как невозможно выделить особенности поведения ОАР непосредственно перед землетрясением (рисунок 2 на вкладке).

Далее приведен пример сопоставления землетрясений и предшествующих аномалий (рисунок 3 на вкладке). Существенными характеристиками землетрясений в данном случае являются отношение магнитуды к логарифму расстояния и само расстояние от эпицентра до станции мониторинга ОАР.

Рисунок 3 (вкладка) отображает две ярко выраженные радоновые аномалии и четыре последующих события. Характеристики событий: 1) $K=2.43$ и $R=353$, км; 2) $K=2.31$ и $R=109$; 3) $K=2.28$ и $R=86$; 4) $K=2.63$ и $R=80$.

18.11 наблюдались повышение регистрируемой концентрации почвенного радона, затем проявился экстремум аномалии 19.11, 22.11 аномалия вернулась к фоновым значениям. С 16.11 по 22.11 землетрясений с $K \geq 2$ не происходило. Далее наблюдается ещё одна аномалия радона (выделена синим цветом). После экстремума 24.11 зафиксировано далёкое землетрясение. Далее

на фоновых значениях зафиксировано три близких землетрясения, процесс подготовки которых отразился на предыдущей аномалии (выделена оранжевым цветом). Таким образом, проводилось выделение аномалий почвенного радона и их сопоставление с зафиксированными землетрясениями на всём выбранном временном интервале с 2011 по 2018 годы.

Общее количество землетрясений за рассмотренный период с $K \geq 2$ составило 166, из которых 148 предшествовали аномалии R_n (89%). Количество событий с $K \geq 2.5$ составило 36 и все они отразились в кривых ОАР. Кроме того на основе анализа полученного графика рассмотренных тектонических землетрясений в поле мониторинговых значений ОАР (рисунок 4 на вкладке) рассматривался выделенный критерий $M/LgR \geq 2.2$.

Причина выделения $K \geq 2.2$ в первую очередь обусловлена тем фактом, что большое количество землетрясений с $M < 5.6$ на расстоянии < 200 км от станции мониторинга и землетрясений с $M > 6$ на расстоянии от станции мониторинга свыше 200 км не удовлетворяют $K \geq 2.5$, но многим из них предшествовали радоновые аномалии. Также по графику (рисунок 4 на вкладке) видно, что при соотношению $M/LgR \leq 2.2$ значительно возрастает количество сейсмических событий, которые не отразились в кривых ОАР. Среди 90 рассмотренных землетрясений, соответствующих $K \geq 2.2$, на станциях наблюдения отмечались аномальные изменения ОАР перед 88 событиями, что составляет 97.7%.

Но на основе разработанной методики сопоставления радоновых аномалий предпочтительнее использовать величину геодинамического критерия $K \geq 2$, при котором учитываются все рассмотренные землетрясения с магнитудой больше 4 и все зафиксированные аномалии. *Таким образом обосновывается первое защищаемое положение.*

Для определения времени проявления землетрясения по кривой изменения объёмной активности радона необходимо выбрать опорные характерные точки. Единственной точкой, которая чётко идентифицируется на кривой, является точка максимума ОАР (рисунок 5 на вкладке).

Практически все события происходят после прохождения точки максимума. Для того, чтобы это подтвердить необходимо было определить характерные параметры для каждого землетрясения, к процессу подготовки которого приурочена аномалия объёмной активности радон. В данном случае характерными параметрами выступали время проявления экстремума предшествующей радоновой аномалии и время проявления землетрясения (рисунок 5 на вкладке).

Рассматривались все землетрясения, удовлетворяющие $K \geq 2$. Для каждого тектонического события из рассмотренных определялась разница между временем землетрясения и временем максимума аномалии, предшествующей этому событию (рисунок 6 на вкладке).

Таким образом удалось определить положение землетрясения относительно экстремума аномальных значений на временном интервале. За точку начала координат по оси абсцисс принималась точка экстремума аномалии. Соответственно для событий, которые происходили уже после проявления максимума предшествовавшей радоновой аномалии в результате

получены положительные значения по разнице двух рассмотренных параметров. В том случае, если событие отразилось до экстремума, ему соответствовал бы отрицательный временной интервал.

Исходя из анализа полученного графика (рисунок 6 на вкладке) можно сделать вывод, что все рассмотренные события, удовлетворяющие $K \geq 2$, которым предшествовала аномалия радона, произошли уже после экстремума, либо совпали с ним по времени.

Для проверки существования закономерности между аномалиями радона и последующими землетрясениями применялась модифицированная методика исследования распределения землетрясений по интервалам между ними.

Основными элементами методики исследования распределения землетрясений во времени являются: составление числовой последовательности интервалов между землетрясениями, следующими друг за другом; расчёт теоретической числовой последовательности, соответствующей закону Пуассона; сравнение экспериментальной и числовой теоретической последовательности. Результат выражается доверительной вероятностью.

Предполагается, что закономерность между распределениями землетрясений и аномалий ОАР присутствует, в том случае, если теоретическая вероятность отражения случайных интервалов времени со случайными землетрясениями, распределёнными по закону Пуассона, ниже экспериментальной.

Отдельно рассматривались последовательности сейсмических событий, удовлетворяющих соотношениям $M/\lg R \geq 2$ и $M/\lg R \geq 2.2$ и соответствующие выделенные аномалии. Согласно методике, выполнялось составление числовых последовательностей интервалов между следующими друг за другом землетрясениями и наблюдавшимися аномалиями ОАР и вычислялись их параметры. Затем, на основе вычисленных данных (математическое ожидание), для землетрясений и радоновых аномалий рассчитывались случайные теоретические числовые последовательности, соответствующие закону распределения Пуассона. На заключительном этапе сравнивались полученные случайные теоретические вероятности с экспериментальными.

Для землетрясений, удовлетворяющих критерию ≥ 2 экспериментальная вероятность составила 0.89, теоретическая 0.35. Для сейсмических событий, удовлетворяющих критерию ≥ 2.2 аналогичные величины составили 0.98 и 0.2, соответственно. В результате применения методики исследования распределений землетрясений и радоновых аномалий установлено, что для рассмотренных событий по критериям ≥ 2 и ≥ 2.2 полученные теоретические вероятности отражения землетрясений в радоновых аномалиях в обоих случаях значительно ниже вероятностей, полученных экспериментально. Это свидетельствует о наличии причинно-следственной связи между экспериментально полученными выборками аномалий и землетрясений.

Таким образом обосновывается второе защищаемое положение.

ГЛАВА 4

Исходя из того, что большую угрозу несут в основном землетрясения «ближней» зоны, одной из приоритетных задач является разделение

тектонических событий по зонам возникновения. Для выполнения данной задачи рассматривались два характерных параметра: время проявления землетрясения и время окончания предшествующей радоновой аномалии (рисунок 5 на вкладке).

В результате исследования было выявлено, что далекие события отмечаются на нисходящей ветви в основном до выхода аномалии на фоновые значения. Ближние события происходят преимущественно после выхода аномалии на фоновые значения. Граница зон определяется концом аномалии. Поэтому для выявления возможной закономерности важно было определить положение времени проявления каждого землетрясения относительно времени конца аномалии.

Представлена зависимость для рассмотренных землетрясений, удовлетворяющих геодинамическому критерию ≥ 2 (рисунок 7 на вкладке). За точку начала отсчета по оси абсцисс взят момент окончания аномалии. Отрицательные значения характеризуют отражение землетрясения во временном интервале между экстремумом и окончанием аномалии. Положительные значения соответствуют временному интервалу после окончания аномалии и выходу на фоновые значения. Ось ординат показывает расстояние в километрах от станции мониторинга до произошедшего сейсмического события.

Для событий, проявившихся после окончания аномалии характерно расстояние до станции мониторинга в пределах 130 км. А для землетрясений, проявившихся в интервале между экстремумом и окончанием аномалии ОАР, расстояние превышает 180 км. Таким образом, можно считать, что характерный радиус «ближней зоны» находится в пределах 130 км для геодинамических условий Южно-Курильского региона. Интервал между 130 км и 180 км относится к «промежуточной зоне». «Дальняя зона» начинается с расстояний 180 км.

Таким образом обосновывается третье защищаемое положение.

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Изучение аномалий почвенного радона представляет особый интерес, как вероятный предвестник тектонических землетрясений. Разработка эффективной методики наблюдения и интерпретации радоновых аномалий в перспективе позволит увеличить вероятность успешного прогноза землетрясений в комплексе с другими методами.

С помощью разработанной методики ретроспективного анализа и сопоставления аномалий радона, полученных с 2011 по 2018 гг. на Южно-Курильском геодинамическом полигоне и тектоническими событиями, произошедшими за аналогичный период, между ними выявлена связь, выражающаяся в высоком процентном соотношении.

По результатам проведенных исследований выявлены закономерности отражения землетрясений в кривых аномалий ОАР в геолого-тектонических условиях сейсмически активного региона.

Полученные закономерности позволяют оценивать отражение тектонических землетрясений в вариациях объёмной активности радона в зависимости от расстояния между станцией мониторинга и эпицентром.

С точки зрения перспектив проведённого исследования дальнейшая работа в направлении мониторинга ОАР может быть улучшена организация передачи данных по удалённым каналам связи в режиме онлайн, что позволит оперативно оценивать изменяющуюся тектоническую ситуацию. Также увеличение частоты опробования ОАР позволит эффективнее отслеживать изменения с большей детализацией, с учётом того, что такую возможность обеспечивает применение адвективного способа доставки Rn к детектору.

Ещё одним важным шагом является расширение сети наблюдательных станций, что возможно позволит получить дополнительную информацию о направлении на эпицентр события и его магнитуде.

ПУБЛИКАЦИИ В ЖУРНАЛАХ ИЗ ПЕРЕЧНЯ ВАК

1. **Бирюлин, С.В.** Влияние циклических изменений величины одноосного сжатия на относительную проницаемость базальтов и известняков / С.В. Бирюлин, И.А. Козлова, А.К. Юрков // Известия Уральского государственного горного университета. – 2019. – № 4(56). – С. 113-117.

2. **Бирюлин, С.В.** Исследование информативности объёмной активности почвенного радона при подготовке и реализации тектонических землетрясений на примере Южно-Курильского региона / С.В. Бирюлин, И.А. Козлова, А.К. Юрков // Вестник КРАУНЦ. Науки о Земле. – 2019. – № 4(44). – С. 73-83.

3. **Бирюлин, С.В.** Связь между аномалиями объёмной активности радона и процессом подготовки землетрясений (на примере Южных Курил) / С.В. Бирюлин, И.А. Козлова, А.К. Юрков // Известия Уральского государственного горного университета. – 2021. – №4(64). – С. 34-43.

4. Козлова, И.А., Изменения объёмной активности почвенного радона и температурные вариации в скважине во время процесса подготовки землетрясения / И.А. Козлова, **С.В. Бирюлин**, А.К. Юрков, Д.Ю. Демежко // Геозкология. Инженерная геология. Гидрогеология. Геокриология. – 2021а. – №6. – С. 28-36.

5. Юрков, А.К. Определение коэффициента диффузии и скорости адвекции радона в условиях мгновенного источника при диффузионно-адвективном переносе в горных породах / А.К. Юрков, **С.В. Бирюлин**, И.А. Козлова // АНРИ. – 2020. – № 1(100). – С. 54-60.

6. Козлова, И.А. Поведение аномалий объёмной активности почвенного радона во время подготовки тектонических землетрясений / И.А. Козлова, **С.В. Бирюлин**, А.К. Юрков // Литосфера. – 2021. №5. – С.724-733.

ПУБЛИКАЦИИ В ДРУГИХ ИЗДАНИЯХ

1. **Бирюлин, С.В.** Изменение объёмной активности радона в верхней части геологического разреза при воздействии низкочастотных упругих колебаний / С.В. Бирюлин // Материалы сборника XXI Уральской молодежной

научной школы по геофизике, Екатеринбург, 23-27 марта 2020 г. – Екатеринбург, 2020. – С. 24-26.

2. **Бирюлин, С.В.** Изменение проницаемости горных пород при одноосном сжатии / С.В. Бирюлин // Материалы сборника XIX Уральской молодежной научной школы по геофизике, Екатеринбург, 26-30 марта 2018 г. – Екатеринбург, 2018. – С. 24-26.

3. **Бирюлин, С.В.** Отражение тектонических землетрясений в поле объёмной активности радона по наблюдениям на геодинамических полигонах / С.В. Бирюлин, И.А. Козлова, А.К. Юрков // Материалы конференции: «Десятые научные чтения памяти Ю.П. Булашевича. Глубинное строение, геодинамика, тепловое поле Земли, интерпретация геофизических полей», Екатеринбург, 23-27 сентября 2019 г. – Екатеринбург, 2019. – С. 45-49.

4. **Бирюлин, С.В.** Поведение поля объёмной активности радона при подготовке и реализации сейсмических событий по наблюдениям на станциях Курильск и Южно-Курильск / С.В. Бирюлин, Д.Ю. Демежко, И.А. Козлова, А.К. Юрков // Тезисы докладов III Всероссийской научной конференции с международным участием. отв. ред. Л.М. Богомолов. Геодинамические процессы и природные катастрофы, Южно-Сахалинск, 27-31 мая, 2019 г. – Южно-Сахалинск, 2019. – С. 20.

5. **Бирюлин, С.В.** Применение отношения магнитуды сейсмического события к логарифму расстояния до эпицентра при выборе сети радонового и температурного мониторинга / С.В. Бирюлин // Сборник материалов XX Уральской молодежной научной школы по геофизике, Пермь, 18-22 марта 2019 г. – Пермь, 2019. С. 19-24.

6. Юрков, А.К. Исследование возможности применения угольных фильтров для очистки радоносодержащей воды / А.К. Юрков, И.А. Козлова, **С.В. Бирюлин** // Уральский геофизический вестник. – 2018. – № 2(32). – С. 67-70.

7. Юрков, А.К. Особенности выделения радона из образцов горных пород при повторном нагреве / А.К. Юрков, И.А. Козлова, **С.В. Бирюлин** // Уральский геофизический вестник. – 2017. – № 2(30). – С. 79-82.

8. Юрков, А.К. Отражение сейсмических событий в радоновом и температурном полях в зонах растяжения и сжатия / А.К. Юрков, Козлова И.А., **Бирюлин С.В.** // Материалы XI международной школы-семинара «Физические основы прогнозирования разрушения горных пород», Пермь, 14-18 октября 2019 г. – Пермь, 2019. – С. 73-74.

9. Юрков, А.К. Сейсмическое событие 19.10.2015 года на Среднем Урале в поле объёмной активности радона / А.К. Юрков, И.А. Козлова, **С.В. Бирюлин** // Материалы конференции: «Девятые научные чтения Булашевича, Глубинное строение, геодинамика, тепловое поле, интерпретация геофизических полей», Екатеринбург, 18-22 сентября, 2017. – Екатеринбург, 2017. – С.480-483.

10. Юрков, А.К. Сравнение методов определения радоноопасности территорий под застройку / А.К. Юрков, И.А. Козлова, **С.В. Бирюлин** // Материалы VI международной научно-практической конференции «Экологическая геология: теория, практика и региональные проблемы», Севастополь, 16-18 сентября 2019 г. – Севастополь, 2019. – С. 273-278.

Подписано в печать 12.05.2022г. Формат 60×84 1/16
Бумага офсетная. Печать Riso.
Усл. печ. л. 1,40. Уч.-изд. л. 1,30. Тираж 150 экз. Заказ 269.
Отпечатано в Институте земной коры СО РАН
664033, Иркутск, ул. Лермонтова, 128.