



УДК 556.06+556.043 (571.55)
DOI <https://doi.org/10.26516/2073-3402.2020.33.100>

Предварительные результаты исследования взаимосвязи сейсмической активности с концентрацией радона в подземных водах Южного Приангарья

А. К. Семинский

Институт земной коры СО РАН, г. Иркутск, Россия

К. Ж. Семинский

*Институт земной коры СО РАН, г. Иркутск, Россия
Иркутский научный центр СО РАН, г. Иркутск, Россия*

Аннотация. Цель данного этапа исследований – изучение взаимосвязи радиоактивности подземных вод Южного Приангарья с сейсмической обстановкой в регионе. Для выявления и изучения этой зависимости были организованы ежедневный мониторинг содержания в подземных водах радиоактивного газа радона в опорном источнике и периодические измерения в семи других водопроявлениях. По результатам режимных наблюдений получен массив числовых данных, включающий информацию об энергетических классах (К[ед.]) произошедших в пределах Байкальского региона сейсмических событий и флуктуациях концентрации растворенного радона (Q [Бк/л]) в базовом из исследованных водоисточников. Полученный материал характеризуется единой методической и метрологической основой с девятилетним мониторингом, проведенным на данной территории в 2012 г., и пригоден для использования в качестве базы для дальнейших исследований. Выявлены слабая обратная статистическая связь между параметрами Q и K и умеренное прямое влияние сейсмичности на последующие всплески радоновой активности. При этом время «задержки» реакции эманационного поля составило примерно четверо суток. Кроме того, доказательством существования взаимосвязи рассматриваемых параметров явилось снижение объемной активности радона на 15–20 % во всех изученных водопроявлениях после наиболее крупных сейсмических событий в регионе, произошедших в период опробования. Важной особенностью является то, что расстояния, на которых был зафиксирован отклик эманационного поля, во всех случаях превысили расчетные значения. Из известных моделей колебаний параметра Q , связанных с подготовкой сейсмических событий, наибольшую сходимость применительно к оригинальным результатам проявила модель, предложенная Т. Куо. В зоне растяжения Байкальского рифта, согласно модели Куо, подготовка деформации происходит в три стадии, на первой из которых концентрация растворенного радона неизменна, на второй снижается, а на третьей возвращается к первоначальным значениям. Разница заключается в том, что в пределах Южного Приангарья присутствует «задержка» реакции эманационного поля, а после события на некоторое время увеличивается интенсивность эманации. Представленные в статье предварительные результаты позволяют рассчитывать на выявление в дальнейшем краткосрочных предвестников сильных землетрясений в Южном Прибайкалье, отличающемся наиболее развитой инфраструктурой в Байкальском регионе.

Ключевые слова: подземные воды, мониторинг, радон, землетрясения, Южное Приангарье.

Для цитирования: Семинский А. К., Семинский К. Ж. Предварительные результаты исследования взаимосвязи сейсмической активности с концентрацией радона в подземных водах Южного Приангарья // Известия Иркутского государственного университета. Серия Науки о Земле. 2020. Т. 33. С. 100–111. <https://doi.org/10.26516/2073-3402.2020.33.100>

Введение

Эманации глубинных газов характеристически связаны с геодинамическими процессами, происходящими на различных глубинах, являясь при этом важным фактором межгеосферных взаимодействий. Одним из часто используемых для исследования газов является радон, повсеместно распространенный в земной коре и легко регистрируемый вследствие своей радиоактивности. Высокая относительно других инертных газов растворимость радона в воде позволяет выделять разломные зоны (являющиеся путями миграции газонасыщенных флюидов) по пространственному положению радоновых аномалий на поверхности. В настоящее время предпринимаются попытки оценки современной активности разрывных нарушений по интенсивности эманаций и прогноза сильных сейсмических событий по эманационным «предвестникам». Известно несколько сценариев изменчивости объемной активности радиоактивного газа в подземных водах при подготовке, во время и после сейсмического события, которые характеризуются принципиальными отличиями [Козлова, Юрков, 2005; Мониторинг радона при изучении ... , 2006; King, 1980; King, Walkingstick, Basler, 1991; Kuo, 2014]. Предлагаемые модели отличаются не только характером самого предвестника, но и его параметрами – временем проявления и расстоянием, на котором этот предвестник может быть зафиксирован [Dobrovolsky, Zubkov, Miachkin, 1979; Hauksson, 1981; Rikitake, 1988; Virk, 1996; Morgounov, Malzev, 2007; Fleischer, 1985].

Указанные исследования характеризуются высокой степенью достоверности, подкреплены большим количеством фактического материала и являются кондиционными для изученных регионов. Исходя из этого, можно заключить, что для каждой тектонической обстановки необходима организация собственных режимных наблюдений с целью оценки связи эманаций с геодинамической активностью и выявления общих закономерностей флуктуаций радонового поля во времени, специфичных для конкретных территорий. Особую актуальность подобные исследования имеют для Байкальского региона в связи со сложной структурной обстановкой, а также повышенной сейсмической активностью вследствие процесса рифтообразования у южного края Сибирского кратона.

Комплексные работы, частью которых являются представленные исследования, ведутся на всей территории Байкальского рифта для выявления закономерностей флуктуаций радонового поля в пространстве и времени. На ранних стадиях были осуществлены: 1) площадная радиометрическая съемка источников подземных вод в разных масштабах с последующей классификацией опробованных водопроявлений по объемной активности растворенного радона (Q) и выявлением факторов, оказывающих влияние на формирование эманационного поля; 2) мониторинг эманаций радона (на ос-

нове разработанных критериев выбора опорной сети режимных наблюдений) с получением длинных рядов данных (включающих физико-химические характеристики подземных вод, а также разнородные параметры окружающей среды) и выявлением общих закономерностей временных флуктуаций.

Описываемые режимные наблюдения за уровнем объемной активности растворенного в подземных водах радона проводятся на территории Южного Приангарья с 2012 г. [Семинский, Семинский, 2016]. Сеть опробования располагается на селитебных землях и в тектоническом отношении принадлежит к зоне влияния купного Ангарского разлома, активизированного в процессе современного рифтогенеза (рис. 1). Она включает восемь водопроявлений в пределах г. Иркутска и на правом берегу Иркутского водохранилища, отвечающих всем предъявляемым к мониторингу требованиям, а именно: концентрация радона $16 \leq Q \leq 99$ Бк/л; наличие незастойного режима водообмена и ограниченного доступа кислорода к подземным водам; круглогодичное функционирование; приуроченность к бортам долин разломного происхождения. Замеры осуществляются два раза в месяц с использованием радиометров радона РРА-01М-03 и «Камера-01».

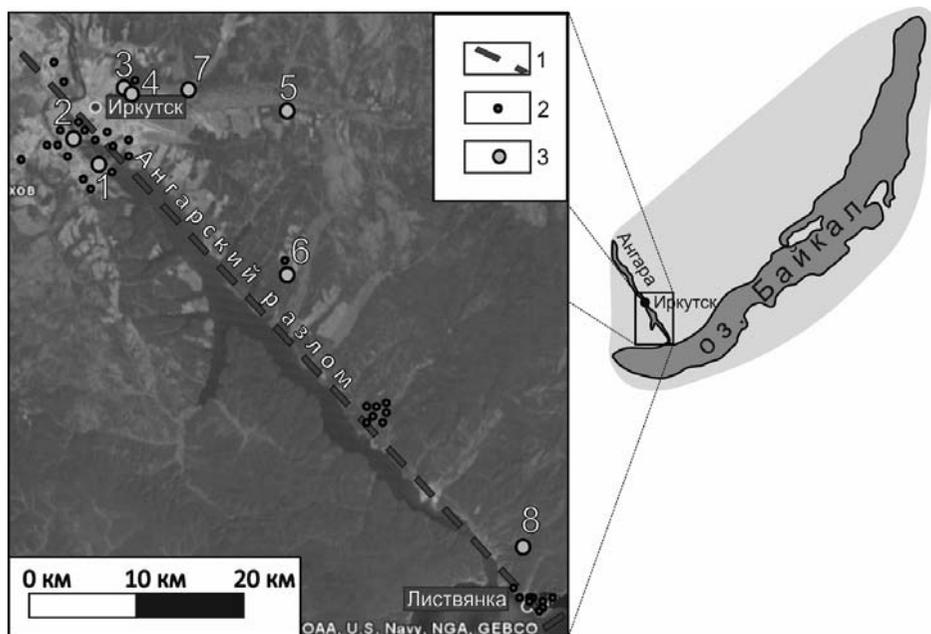


Рис. 1. Схема расположения опробованных водопроявлений на территории Южного Приангарья.

1 – осевые линии изучаемых разломных зон; 2 – опробованные источники; 3 – источники, вошедшие в мониторинговую сеть (1 – Южная, 2 – Колхозная, 3 – Радищево1, 4 – Радищево-2, 5 – Худяково, 6 – Авиатор, 7 – Плишкино, 8 – Никола)

Целью данного этапа исследований является изучение связи параметра Q в подземных водах Южного Приангарья с сейсмической активностью в регионе.

Для достижения намеченной цели были поставлены следующие задачи: во-первых, организовать кратковременный мониторинг, направленный на выявление взаимосвязи между сейсмической активностью в регионе и концентрацией радона; во-вторых, с помощью методов математической статистики проанализировать уже имеющийся массив режимных наблюдений вкупе с новыми данными на предмет выявления такой связи; в-третьих, дать оценочную характеристику сходимости полученных результатов с опубликованными данными предшественников.

Результаты

Решение первой задачи заключалось в организации дополнительных, более детальных, режимных наблюдений. Из числа опробуемых водопроявлений, входящих в действующую сеть мониторинга, был выбран один источник, обладающий средней относительно остальных пунктов концентрацией растворенного радиоактивного газа. Отбор проб осуществлялся в течение двух месяцев ежедневно в одно и то же время суток. Кроме результатов измерений концентрации растворенного радона, в числовой массив вошла информация о сейсмической активности в Байкальском регионе (предоставленная Байкальским филиалом единой геофизической службы Российской академии наук [Байкальский филиал геофизической службы]). Таким образом, был сформирован массив числовых данных – необходимых и достаточных для использования в качестве основы для проведения дальнейших исследований.

За два месяца (ноябрь и апрель), в течение которых проводились измерения, произошло 23 землетрясения с энергетическими классами (K) от 9,2 до 11,2 (рис. 2) и эпицентрами, находящимися на разном удалении от пункта мониторинга. Такое количество событий является достаточным для исследования связи между параметрами Q и K . Однако с целью повышения достоверности исследования целесообразно анализировать массив кратковременного мониторинга совместно с уже имеющимся массивом девятилетней продолжительности, сформированным при частоте измерений один раз в две недели. Такая возможность обеспечивается единством методических и метрологических подходов, применяемых при проведении режимных наблюдений разной продолжительности.

Для решения второй из поставленных задач были применены следующие виды статистического анализа: метод средних величин, графических изображений, парная корреляция. В первую очередь следует отметить низкий уровень статистической связи, выявленный по результатам корреляции временных рядов сейсмической активности в регионе попарно с концентрацией растворенного радона для каждого из восьми источников. Коэффициент корреляции колебался от $-0,24$ до $0,19$, средний по сети составил $-0,06$, что можно интерпретировать как полное отсутствие линейной зависимости, однако в половине источников этот показатель находился в пределах от $-0,24$ до $-0,13$, что при используемом количестве коррелируемых пар, согласно шкале Чеддока (табл.), может быть охарактеризовано как слабая обратная статистическая связь.

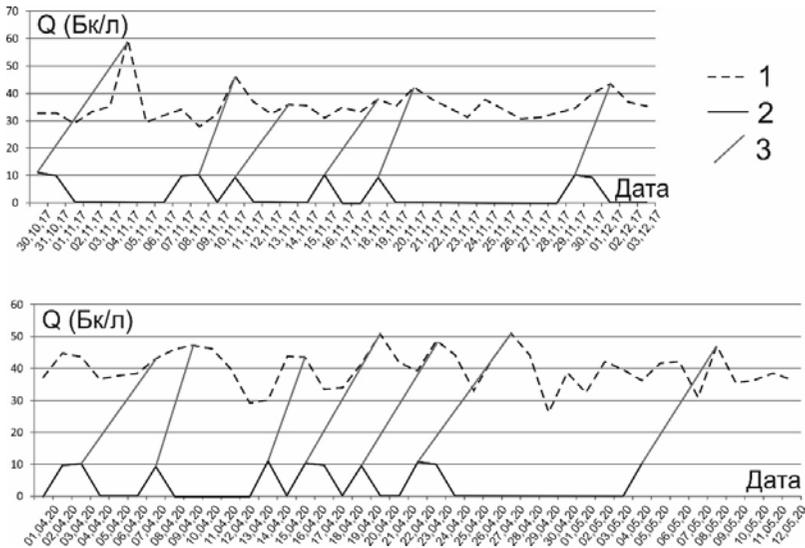


Рис. 2. Сопоставление вариаций параметров Q и K по данным ежедневного мониторинга в 2017 (вверху) и 2020 (внизу) годах.

1 – объемная активность радона (Q) в пункте мониторинга № 1 (Южная);
 2 – энергетические классы (K) происходящих в Байкальском регионе сейсмических событий; 3 – наглядное отражение «задержки» реакции эманационного поля на сейсмические события

Таблица

Шкала Чеддока

Теснота связи	Значение коэффициента корреляции r при наличии	
	прямой связи	обратной связи
Слабая	$r < 0,3$	$-0,3 < r$
Умеренная	$0,3 \leq r < 0,5$	$-0,5 < r \leq -0,3$
Заметная	$0,5 \leq r < 0,7$	$(-0,7) < r \leq (-0,5)$
Высокая	$0,7 \leq r < 0,9$	$(-0,9) < r \leq (-0,7)$
Весьма высокая	$0,9 \leq r < 1$	$(-1) < r \leq (-0,9)$

Корреляционный анализ массива данных кратковременных режимных наблюдений в целом подтверждает полученный результат. Важной особенностью является то, что дополнительный анализ, проведенный со смещением ряда объемной активности радона в сторону более раннего времени, позволил отметить усиление корреляционной связи. Так, при смещении временного ряда на четверо суток была зафиксирована максимальная теснота статистической связи на уровне 0,372, причем знак перед коэффициентом изменился. Следовательно, присутствие и интенсивность сейсмического события, согласно шкале Чеддока, имеют умеренное прямое влияние на последующее увеличение концентрации растворенного радона (см. рис. 2).

Результаты корреляции не позволяют сделать вывод о наличии или отсутствии однозначной взаимосвязи между анализируемыми параметрами,

что может быть обосновано двумя главными факторами. Во-первых, сравнительно низкой сейсмической активностью в течение периода мониторинга: в регионе не происходили сильные землетрясения, с которыми обычно связаны значимые изменения напряженного состояния породного массива [Toutain, Baubron, 1999; Woith, 2015; Radon as seismic ... , 2011]. Во-вторых, существенной пространственно-временной неоднородностью распределения происходящих сейсмических событий. Расстояние от опорной сети источников до эпицентров землетрясений составляло от 100 до 700 км, а временной промежуток между событием и опробованием – от нескольких часов до суток, что могло стать причиной некоторой «задержки» реакции эманационного поля и снизить общую эффективность формализованных статистических методов анализа.

В условиях низкой эффективности применения методов математической статистики подтверждением существования такой связи могут выступать единичные изменения концентрации растворенного радона до, во время и после сейсмического события. В качестве таких примеров предлагается рассмотреть снижение концентрации растворенного радона после наиболее сильных землетрясений (1-е: дата – 16.03.2018, время – 04:28:38, широта – 52,05, долгота – 105,65, расстояние от сети мониторинга – 100 км, энергетический класс – 11,2; 2-е: дата – 29.03.2019, время – 07:22:03, широта – 51,71, долгота – 101,54, расстояние от сети мониторинга – 217 км, энергетический класс – 13,3), совпавших с днями проведения режимных наблюдений. Анализ проб воды, отобранных за час до сейсмического события в первом случае и за 22 часа во втором, показал стандартные для исследуемых источников концентрации, характерные для данного сезона года. Однако дополнительно проведенное опробование через сутки после землетрясения в первом случае и через 7 часов во втором выявило снижение концентрации радиоактивного газа практически во всех опробуемых водопунктах примерно на 15–20 % от значений, полученных при отборе перед сейсмическим событием. Вероятнее всего, механизм таких изменений концентрации радиоактивного газа, растворенного в воде, заключается в том, что в процессе разрушения массива пород в результате реализации упругих напряжений наблюдается активное трещинообразование, а также раскрытие пустот, вследствие чего часть растворенного радона переходит в свободное состояние, понижая тем самым свою концентрацию в воде.

Важным аспектом исследования в данном случае является обширная зона влияния произошедших сейсмических событий. Согласно литературным данным [Long range gas-geochemical ... , 2011], существует около десятка различных методов расчета радиуса эманационного отклика поля радона. Наиболее часто применяются формулы:

- 1) $R = 10^{0,43M}$ при $M \geq 3$ [Dobrovolsky, Zubkov, Miachkin, 1979];
- 2) $R = 10^{(M + 0,43)/2,4}$ [Hauksson, 1981];
- 3) $R = 10^{(0,38M + 0,33)}$ [Rikitake, 1988];
- 4) $R = 10^{(0,5M - 0,27)}$ [Morgounov, Malzev, 2007],

согласно которым магнитуда произошедшего землетрясения (M [баллы]) является частью степенного показателя десятикилометрового радиуса (R [км]) зоны эманационного отклика. Применение данных формул к произошедшим в Байкальском регионе сейсмическим событиям позволило рассчитать, что максимальное расстояние, на котором возможна фиксация радоновой аномалии, находилось в пределах 50–70 км от эпицентра в первом случае и 160–190 км – во втором (рис. 3). Особенность заключается в том, что эпицентры рассматриваемых землетрясений располагались на значительном удалении от опорной сети мониторинга (100 и 217 км), т. е. в обоих случаях фактические расстояния до пунктов опробования, где во временных рядах отчетливо были зафиксированы эманационные отклики сейсмических событий, превысили расчетные показатели на треть.

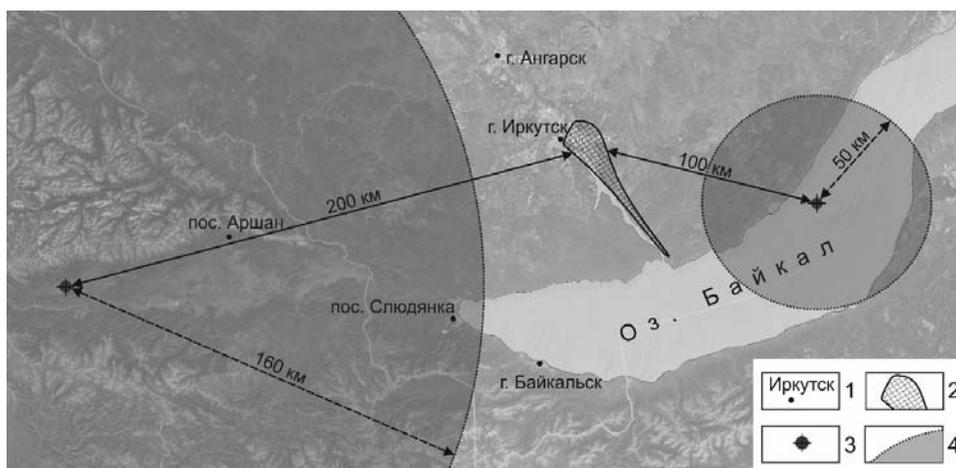


Рис. 3. Схема расположения эпицентров наиболее сильных сейсмических событий на территории Байкальского региона (2018–2019 гг.) относительно опорной сети мониторинга.

1 – наиболее крупные населенные пункты; 2 – территория расположения сети пунктов мониторинга; 3 – эпицентры сейсмических событий; 4 – расчетные зоны влияния землетрясений

Подобный результат может быть обусловлен повышенной проницаемостью разломных зон Байкальского рифта для газов и газонасыщенных флюидов, увеличенные скорости миграции которых позволяют фиксировать аномалии на значительном удалении от эпицентра события. Кроме того, следствием этого эффекта может быть появление некоторой «задержки» реакции эманационного поля, составляющей, по данным предварительного анализа рядов кратковременного мониторинга, примерно четверо суток. Для данного региона подобная закономерность впервые была отмечена в 2013 г. [Seminsky, Bobrov, 2013], когда катастрофическое землетрясение, произошедшее в Японии, отчетливо проявилось в виде всплеска активности во временных вариациях почвенного радона, зафиксированных в Прибайкалье. Вышесказанное подтверждает вывод, сделанный исследователями из Индии

в 2011 г. [Long range gas-geochemical ... , 2011], согласно которому предвестниковые эффекты крупных землетрясений могут возникать в «тектонически чувствительных» регионах на расстояниях, значительно превышающих расчетные.

Третья задача состояла в том, чтобы дать оценочную характеристику сходимости полученных в оригинальном исследовании результатов с данными предшественников. Для этого были проанализированы описанные в научных публикациях модели флуктуаций эманационного поля под влиянием сейсмических событий. Наибольший интерес вызвала модель, предложенная Т. Куо [2014], согласно которой в зоне растяжения подготовка деформации происходит в три стадии. Первая стадия заключается в накоплении внутренних напряжений в массиве горных пород, концентрация радона при этом остается на соответствующем для данного источника уровне. Вторая стадия характеризуется растяжением массива с увеличением пространства пустот, а также образованием новых трещин; как следствие, интенсивность эманации увеличивается, а растворенный радон переходит из воды в свободное поровое пространство. Также увеличивается скорость подтока свежей воды, что влечет снижение концентрации растворенного радона. Подготовка деформации переходит в третью стадию непосредственно перед сейсмическим событием. Вода заполняет весь объем новообразованных пустот, что приводит к обратному фазовому переходу свободного радона в растворенное состояние. Концентрация радиоактивного газа в воде возвращается на уровень, характерный для данного источника в сейсмически стабильной обстановке. С помощью данной модели исследователям удалось спрогнозировать четыре крупных землетрясения в Тайване.

Следует отметить, что характер флуктуаций радонового поля при подготовке, во время и после землетрясений на территории Южного Приангарья проявляет сходные черты с предложенной моделью. Отличие заключается в том, что в оригинальном исследовании присутствует некоторая «задержка» реакции эманационного поля, которая связана, вероятнее всего, с пространственной удаленностью эпицентров происходящих на данной территории землетрясений. Согласно полученным результатам, эта «задержка» составляет примерно четверо суток. То есть третья стадия подготовки деформации, начавшаяся непосредственно перед сейсмическим событием, когда объемная активность растворенного радона начинает возвращаться на прежний уровень, отмечается в пунктах режимных наблюдений уже после события. Присутствие повышенных концентраций радона после события также не описывается в предложенном сценарии, однако связано, очевидно, со всплеском эманирования вследствие раскрытия новых трещин.

Выводы

Проведенное исследование позволяет сделать следующие предварительные выводы.

1. По результатам режимных наблюдений получен массив числовых данных, включающий информацию об энергетических классах (K) произо-

шедших в пределах Байкальского региона сейсмических событий и флуктуациях концентрации растворенного радона (Q) в базовом из исследованных водоисточников. Полученный материал характеризуется единой методической и метрологической основой с девятилетним мониторингом, организованным на данной территории в 2012 г., и пригоден для использования в качестве базы для проведения дальнейших исследований.

2. Выявлены слабая обратная статистическая связь между параметрами Q и K и умеренное прямое влияние сейсмичности на последующие всплески радоновой активности. При этом время «задержки» реакции эманационного поля составило примерно четверо суток. Кроме того, доказательством существования взаимосвязи рассматриваемых параметров явилось снижение объемной активности радона на 15–20 % во всех изученных водопроявлениях после наиболее крупных сейсмических событий в регионе, произошедших в период опробования. Важной особенностью является то, что расстояния, на которых был зафиксирован отклик эманационного поля, во всех случаях превысили расчетные значения.

3. Из известных моделей колебаний параметра Q , связанных с подготовкой сейсмических событий, наибольшую сходимость применительно к оригинальным результатам проявила модель, предложенная Т. Куо. В зоне растяжения Байкальского рифта, согласно модели Куо, подготовка деформации происходит в три стадии, на первой из которых концентрация растворенного радона неизменна, на второй снижается, а на третьей возвращается к первоначальным значениям. Разница состоит в том, что в пределах Южного Приангарья присутствует «задержка» реакции эманационного поля, а после события на некоторое время увеличивается интенсивность эманаций.

Представленные в статье предварительные результаты позволяют рассчитывать на выявление в дальнейшем краткосрочных предвестников сильных землетрясений в Южном Прибайкалье, отличающемся наиболее развитой инфраструктурой в Байкальском регионе.

Исследования проводились при поддержке интеграционной программы ИИЦ СО РАН «Фундаментальные исследования и прорывные технологии как основа опережающего развития Байкальского региона и его межрегиональных связей (0341-2015-0001)».

Список литературы

Байкальский филиал геофизической службы [Электронный ресурс]. 2018. URL: <http://seis-bykl.ru/> (дата обращения: 10.05.2020).

Козлова И. К., Юрков А. К. Методические вопросы измерения содержания радона-222 в почвенном воздухе при мониторинговых наблюдениях // Уральский геофизический вестник. 2005. № 7. С. 31–34.

Мониторинг радона при изучении процесса подготовки тектонического землетрясения на северном Тянь-Шане / В. И. Уткин, Э. Мамыров, М. В. Канн, С. В. Кривашеев, А. К. Юрков, И. И. Косякин, А. Н. Шишканов // Физика Земли. 2006. № 9. С. 61–70.

Семинский К. Ж., Семинский А. К. Радон в подземных водах Прибайкалья и Забайкалья: пространственно-временные вариации // Геодинамика и тектонофизика. 2016. Т. 7, № 3. С. 477–493.

Dobrovolsky I. P., Zubkov S. I., Miachkin V. I. Estimation of the size of earthquake preparation zones // *Pure Appl. Geophys.* 1979. Vol. 117. P. 1025–1044.

Fleischer R. L. Dislocation model for radon response to distant earthquakes // *Geophys. Res. Lett.* 1981. Vol. 8. P. 477–480.

Fleischer R. L., Mogro-Campero A. Association of subsurface radon changes in Alaska and the northeastern United States with earthquakes // *Geochim. Cosmochim. Acta.* 1985. Vol. 49. P. 1061–1071.

Radon as seismic precursor: new data with well water of Jalpaiguri, India / *D. Ghosh, A. Deb, S. Ranjan, S. Haldar, R. Sengupta* // *NatHazards.* 2011. Vol. 58. P. 877–889.

Hauksson E. Radon content of groundwater as an earthquake precursor: evaluation of worldwide data and physical basis // *J. Geophys. Res.* 1981. Vol. 86. P. 9397–9410.

Long range gas-geochemical anomalies of a remote earthquake recorded simultaneously at distant monitoring stations in India / *C. Hirok, B. Waseem, I. Naseer, K. Rakaesh, G. Debasis, S. Prasanta, S. Bikash* // *Geochemical Journal.* 2011. Vol. 45. P. 137–156.

King C.-Y. Episodic radon changes in subsurface soil gas along faults and possible relation to earthquake // *Journal of Geophys. Research.* 1980. Vol. 85, N 6. P. 3065–3078.

King C.-Y., Walkingstick C., Basler D. Radon in soil gas along active faults in Central California // *Field studies of radon in rock, soil and water: U.S. Geological survey bulletin* / eds. *Gunderon L., Wanty R.* 1991. P. 77–133.

Kuo T. Correlating Precursory Declines in Groundwater Radon with Earthquake Magnitude // *Groundwater.* 2014. Vol. 52, N 2. P. 217–224.

Morgounov V. A., Malzev S. A. A multiple fracture model of pre-seismic electromagnetic phenomena // *Tectonophysics.* 2007. Vol. 431. P. 61–72.

Rikitake T. Earthquake prediction: an empirical approach // *Tectonophysics.* 1988. Vol. 148. P. 195–210.

Seminsky K. Zh., Bobrov A. A. The first results of studies of temporary variations in soil-radon activity of faults in Western Pribaikalie // *Geodynamics & Tectonophysics.* 2013. Vol. 4, N 1. P. 1–12. <https://doi.org/10.5800/GT-2013-4-1-0088>.

Toutain J.-P., Baubron J.-C. Gas geochemistry and seismotectonics: a review // *Tectonophysics.* 1999. Vol. 304. P. 1–27.

Virk H. S. A critique of empirical scaling relationship between earthquake magnitude, epicentral distance and precursor time for interpretation of radon data // *J. Earthquake Prediction. Res.* 1996. Vol. 5. P. 547–583.

Woith H. Radon earthquake precursor: a short review // *Eur. Phys. J. Special Topics.* 2015. Vol. 224. P. 611–627.

Preliminary Results of the Study of the Relationship of Seismic Activity with the Concentration of Radon in Groundwater in the Southern Angara Region

A. K. Seminsky

Institute of the Earth's Crust SB RAS, Irkutsk, Russian Federation

K. Zh. Seminsky

*Institute of the Earth's Crust SB RAS, Irkutsk, Russian Federation
Irkutsk Scientific Center SB RAS, Irkutsk, Russian Federation*

Abstract. The purpose of this research phase is to study the relationship between the radioactivity of groundwater in the southern Angara region and the seismic situation in the region. To identify and study this dependence, daily monitoring of the content of radon radioactive gas in

groundwater in a reference source and periodic measurements in 7 other water supply systems were organized. Based on the results of operational observations, an array of numerical data was obtained, including information on the energy classes (K) of seismic events that occurred within the Baikal region and fluctuations in the concentration of dissolved radon (Q) in the base of the studied water sources. The resulting material is characterized by a unified methodological and metrological basis with nine-year monitoring organized in the territory in 2012 and is suitable for use as a basis for further research. A weak inverse statistical relationship between the Q and K parameters and a moderate direct effect of seismicity on subsequent bursts of radon activity were revealed. At the same time, the “delay” of the reaction of the emanation field was approximately four days. In addition, evidence of the existence of a relationship between the considered parameters was a decrease in the volumetric activity of radon by 15-20% in all studied water phenomena after the largest seismic events in the region that occurred during the testing period. An important feature is that the distances at which the response of the emanation field was recorded exceeded the calculated values in all cases. Of the known models of fluctuations of the Q parameter associated with the preparation of seismic events, the greatest convergence in relation to the original results was shown by the model proposed by Kuo T [Groundwater, 2014]. In the extension zone of the Baikal rift, according to the Kuo model, the preparation of deformation takes place in three stages, in the first of which the concentration of dissolved radon is unchanged, in the second it decreases, and in the third it returns to its original values. The difference lies in the fact that within the Southern Angara region there is a “delay” in the reaction of the emanation field, and after the event, the intensity of emanations increases for some time. The preliminary results presented in the article allow relying on the identification of short-term precursors of strong earthquakes in the South Baikal region, which is distinguished by the most developed infrastructure in the Baikal region.

Keywords: groundwater, monitoring, radon, earthquake, Southern Angara region.

For citation: Seminsky A.K., Seminsky K.Zh. Preliminary Results of the Study of the Relationship of Seismic Activity with the Concentration of Radon in Groundwater in the Southern Angara Region. *The Bulletin of Irkutsk State University. Series Earth Sciences*, 2020, vol. 33, pp. 100-111. <https://doi.org/10.26516/2073-3402.2020.33.100> (in Russian)

References

Baikalskii filial geofizicheskoi sluzhby [Baikal branch of geophysical service]. Available at: <http://seis-bykl.ru/Main> event directory (date of access: 10.05.2020) (in Russian)

Kozlova I.K., Urkov A.K. Metodicheskie izmereniya soderzaniya radona-222 v pochvennom vozduhe pri monitoringovih nabludeniyah [Methodological issues of measuring the content of radon-222 in soil air during monitoring observations]. *Yralskiy geofizicheskiy vestnik* [Ural Geophysical Bulletin], 2005, no. 7, pp. 31-34 (in Russian)

Utkin V.I., Mamirov E., Kann M.V., Krivashev S.V., Yurkov A.K., Kocakin I.I., Shiskanov A.N. Monitoring radona pri izyuchenii prochessa podgotovki tektonicheskij zemletryaseniya na severnom Tyan-Shane [Radon monitoring in the study of the process of preparing a tectonic earthquake in the northern Tien Shan]. *Fizika Zemli* [Earth Physics], 2006, no. 9, pp. 61-70. (in Russian)

Seminskiy K.Zh., Seminskiy A.K. Radon v podzemnyih vodah Pribaykalya i Zabaykalya: prostranstvenno-vremennyye variatsii [Radon in the underground waters of the Baikal and Trans-Baikal region: space-time variations]. *Geodinamika i tektonofizika* [Geodynamics and tectonophysics], 2016, vol. 7, no. 3, pp. 477-493. (in Russian)

Dobrovolsky I.P., Zubkov S.I., Miachkin V.I. Estimation of the size of earthquake preparation zones. *Pure Appl. Geophys.*, 1979, vol. 117, pp. 1025-1044.

Fleischer R.L. Dislocation model for radon response to distant earthquakes. *Geophys. Res. Lett.*, 1981, vol. 8, pp. 477-480.

Fleischer R.L., Mogro-Campero A. Association of subsurface radon changes in Alaska and the northeastern United States with earthquakes. *Geochim. Cosmochim. Acta*, 1985, vol. 49, pp. 1061-1071.

Ghosh D., Deb A., Ranjan S., Haldar S., Sengupta R. Radon as seismic precursor: new data with well water of Jalpaiguri, India. *NatHazards*, 2011, vol. 58, pp. 877-889.

Hauksson E. Radon content of groundwater as an earthquake precursor: evaluation of worldwide data and physical basis. *J. Geophys. Res.*, 1981, vol. 86, pp. 9397-9410.

Hirok C., Waseem B., Naseer I., Rakaesh K., Debasis G., Prasanta S., Bikash S. Long range gas-geochemical anomalies of a remote earthquake recorded simultaneously at distant monitoring stations in India. *Geochemical Journal*, 2011, vol. 45, pp. 137-156.

King C.-Y. Episodic radon changes in subsurface soil gas along faults and possible relation to earthquake. *Journal of Geophys. Research*, 1980, vol. 85, no. 6, pp. 3065-3078.

King C.-Y., Walkingstick C., Basler D. Radon in soil gas along active faults in Central California. *Field studies of radon in rock, soil and water: U.S. Geological survey bulletin*. Gunderon L. and Wanty R. (eds.). 1991, pp. 77-133.

Kuo T. Correlating Precursory Declines in Groundwater Radon with Earthquake Magnitude. *Groundwater*, 2014, vol. 52, no. 2, pp. 217-224.

Morgounov V.A., Malzev S.A. A multiple fracture model of pre-seismic electromagnetic phenomena. *Tectonophysics*, 2007, vol. 431, pp. 61-72.

Rikitake T. Earthquake prediction: an empirical approach. *Tectonophysics*, 1988, vol. 148, pp. 195-210.

Seminsky K.Zh., Bobrov A.A. The first results of studies of temporary variations in soil-radon activity of faults in Western Pribaikalie. *Geodynamics & Tectonophysics*, 2013, vol. 4, no. 1, pp. 1-12. <https://doi.org/10.5800/GT-2013-4-1-0088>.

Toutain J.-P., Baubron J.-C. Gas geochemistry and seismotectonics: a review. *Tectonophysics*, 1999, vol. 304, pp. 1-27.

Virk H.S. A critique of empirical scaling relationship between earthquake magnitude, epicentral distance and precursor time for interpretation of radon data. *J. Earthquake Prediction Res.*, 1996, vol. 5, pp. 547-583.

Woith H. Radon earthquake precursor: a short review. *Eur. Phys. J. Special Topics*, 2015, vol. 224, pp. 611-627.

Семинский Александр Константинович
кандидат геолого-минералогических наук,
младший научный сотрудник
Институт земной коры СО РАН
Россия, 664033, г. Иркутск,
ул. Лермонтова, 128
e-mail: zzzsancheszzz@gmail.com

Seminsky Aleksandr Konstantinovich
Candidate of Sciences (Geology and
Menerology), Junior Researcher
Institute of the Earth's Crust SB RAS
128, Lermontov st., Irkutsk, 664033,
Russian Federation
e-mail: zzzsancheszzz@gmail.com

Семинский Константин Жанович
доктор геолого-минералогических наук,
заведующий лабораторией
Институт земной коры СО РАН,
Россия, 664033, г. Иркутск,
ул. Лермонтова, 128
Иркутский научный центр СО РАН
Россия, 664033, г. Иркутск,
ул. Лермонтова, 134
e-mail: seminsky@crust.irk.ru

Seminsky Konstantin Zhanovich
Doctor of Sciences (Geology and Menerology),
Head of Laboratories
Institute of the Earth's Crust SB RAS,
128, Lermontov st., Irkutsk, 664033,
Russian Federation
Irkutsk Scientific Center SB RAS
134, Lermontov st., Irkutsk, 664033,
Russian Federation
e-mail: seminsky@crust.irk.ru

Коды научных специальностей: 25.00.07, 25.00.03

Дата поступления: 10.06.2020