

На правах рукописи



**СЕМИНСКИЙ Александр Константинович**

**РАДОН В ОБВОДНЕННЫХ РАЗЛОМНЫХ ЗОНАХ  
БАЙКАЛЬСКОГО РИФТА**

Специальности: 25.00.03 – Геотектоника и геодинамика

25.00.07 – Гидрогеология

**АВТОРЕФЕРАТ**

диссертации на соискание ученой степени  
кандидата геолого-минералогических наук

Иркутск – 2019

Работа выполнена в Федеральном государственном бюджетном учреждении науки Институте земной коры Сибирского отделения Российской академии наук (ФГБУН ИЗК СО РАН, г. Иркутск).

**Научный руководитель:**

**Борняков Сергей Александрович**, кандидат геолого-минералогических наук, старший научный сотрудник лаборатории тектонофизики ФГБУН ИЗК СО РАН.

**Официальные оппоненты:**

**Спивак Александр Александрович**, доктор физико-математических наук, профессор, заведующий лабораторией приповерхностной геофизики ФГБУН Института динамики геосфер РАН (ФГБУН ИДГ РАН, г. Москва);

**Диденков Юрий Николаевич**, кандидат геолого-минералогических наук, доцент кафедры прикладной геологии, геофизики и геоинформационных систем ФГБОУ ВО Иркутского национального исследовательского технического университета (ФГБОУ ВО ИрНТУ, г. Иркутск).

**Ведущая организация:**

Федеральное государственное бюджетное учреждение науки Геологический институт Сибирского отделения Российской академии наук (ФГБУН ГИН СО РАН, г. Улан-Удэ)

Защита состоится « 17 » апреля 2019 года в 15-00 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://www.crust.irk.ru/newsfull\\_176.html](http://www.crust.irk.ru/newsfull_176.html)

Отзывы на автореферат в двух экземплярах с подписью, заверенной печатью учреждения, просим направлять ученому секретарю совета, кандидату физико-математических наук Добрыниной Анне Александровне по вышеуказанному адресу или e-mail: [dobrynina@crust.irk.ru](mailto:dobrynina@crust.irk.ru). Тел: 8(3952)427000.

**Автореферат разослан « 01 » февраля 2019 г.**

Ученый секретарь диссертационного совета Д 003.022.03, кандидат физико-математических наук



А.А. Добрынина

## ВВЕДЕНИЕ

**Актуальность темы исследования.** Радиоактивный газ радон ( $^{222}\text{Rn}$ ), растворенный в подземных водах, является объектом многочисленных исследований прикладной направленности. Он представляет опасность для здоровья человека, является поисковым признаком месторождений урана или маркером геодинамически и геохимически активных разломов. Последнее особенно актуально, так как разрывные нарушения контролируют сейсмичность и рудоотложение, а также представляют пути миграции газов и флюидов, влияющих на экологическую обстановку (в частности, радоноопасность) территорий. Для Прибайкалья исследование обводненных разломов имеет особое значение в связи со сложной тектонической обстановкой и высокой сейсмической активностью, которые в данном регионе обусловлены процессом формирования Байкальского рифта у южной окраины Сибирской платформы. Как следствие, широкомасштабное изучение флуктуаций поля радона в пределах рассматриваемого региона актуально в связи с выделением критериев структурно-вещественного контроля газовых эманаций, районирования урбанизированных территорий Прибайкалья по радиоактивности, а также поиска источников подземных вод, пригодных для организации бальнеологических объектов.

**Целью** исследования было изучить закономерности пространственно-временных вариаций концентрации радона в источниках подземных вод Байкальского рифта, связанных с разломами земной коры.

Согласно поставленной цели решались следующие **задачи**:

- 1) разработать на основе площадной радиометрической съемки единую классификацию источников подземных вод по концентрации радиоактивного газа с обоснованием граничных значений, а также определить в соответствии с данной классификацией водопроявления, наилучшим образом подходящие для организации мониторинга;
- 2) выявить закономерности пространственного распределения источников подземных вод, отличающихся концентрацией растворенного радона;
- 3) определить факторы окружающей среды, оказывающие влияние на эманационное поле, а также исследовать степень и характер этого влияния;
- 4) разработать на основе площадной радиометрической съемки методическую основу мониторинговых наблюдений, получить для опорной сети водоисточников длинные ряды измерений объемной активности радона ( $Q$ ) и параметров окружающей среды, провести их комплексный анализ и установить наиболее общие закономерности временных вариаций;
- 5) установить на базе статистического анализа данных мониторинга факторы, оказывающие значимое влияние на газовые эманации, и разработать универсальную модель прогнозирования концентрации растворенного радона, учитывающую закономерности временных вариаций параметра  $Q$  в конкретном источнике.

**Объектом** исследования являлось поле радоновых эманаций Байкальского рифта. В качестве **предмета** исследования выступала радиоактивность источников подземных вод, приуроченных на изучаемой территории к разломным зонам земной коры.

**Методологическая основа и методы.** Применяемые в работе методы образуют две основные группы. К первой относятся полевые и камеральные методы получения фактического материала: радиометрическая съемка, химический анализ проб воды, измерение физико-химических характеристик источников подземных вод, а также анализ литературных источников и баз данных, находящихся в свободном доступе. Вторую группу составляют способы обработки фактического материала, базирующиеся на методах математической статистики (Фурье-, кластерный, корреляционный и другие виды анализа).

**Фактический материал.** В основу диссертационной работы положены материалы, собранные автором за время работы в Институте земной коры СО РАН, включая обучение в очной аспирантуре. Во-первых, это полевые материалы, полученные в ходе проведения экспедиционных работ 2012-2018 гг. в составе полевого отряда лаборатории тектонофизики. Данные включают результаты замеров объемной активности радона, а также некоторых физико-химических параметров для 333 источников подземных вод на территории Прибайкалья. Во-вторых, это результаты мониторинговых измерений в рамках опорной сети из 8 источников подземных вод

Южного Приангарья за тот же временной период. Регулярные замеры производились дважды в месяц в течение 6 лет. База данных мониторинга составила более тысячи измерений комплекса изучаемых параметров. В-третьих, это материалы публикаций, содержащих количественные оценки радиоактивности подземных вод Прибайкалья и смежных регионов.

#### **Защищаемые положения.**

1. По степени радиоактивности подземные воды делятся на семь групп, причем подавляющее большинство водопоявлений Байкальского рифта относится к первым трем: группа I –  $Q \leq 15$  Бк/л, группа II –  $16 \leq Q \leq 99$  Бк/л, группа III –  $100 \leq Q \leq 184$  Бк/л. Для Прибайкалья к фоновым относятся значения, соответствующие первой группе, а в Забайкалье – ко второй, что обусловлено существенным различием в площадях распространения магматических пород кислого состава, характеризующихся повышенным содержанием урана. Присутствие активного разлома, как правило, создает аномальную концентрацию радона в дренирующем его источнике, который в этом случае будет относиться к более высокой группе по радиоактивности: для Прибайкалья – это группа II, а для Забайкалья – группы III-VI.

2. Радоновая активность обводненных разломных зон Байкальского рифта меняется неравномерно вкrest и вдоль их простирания. Существует тенденция повышения концентрации растворенного радона от крыльев к сместителю. Продольная неоднородность проявляется в чередовании участков с повышенной и пониженной концентрацией радона в подземных водах, что связано с неравномерной плотностью разрывов оперения.

3. Объемная активность растворенного радона в источниках подземных вод, приуроченных к разломным зонам, имеет устойчивую зависимость от времени года. В меженные периоды происходит повышение концентрации радиоактивного газа, а в паводковые – ее понижение. Главными факторами, определяющими сезонные флуктуации радиоактивности подземных вод, являются атмосферное давление, температура воздуха, условия питания, формирования и водообмена.

**Научная новизна и теоретическая значимость.** Получена комплексная информация о водопоявлениях на территории Байкальского региона с акцентом на нерадоновые ( $Q < 185$  Бк/л) воды. Выявлены пространственные закономерности распределения источников подземных вод с разной концентрацией радона. Предложена классификация водоисточников по концентрации растворенного радона, которая базируется на полученных в Прибайкалье массовых измерениях и учитывает опыт известных систематик. Изучены общие закономерности временных вариаций параметра  $Q$  в источниках подземных вод юго-западного Прибайкалья и главные факторы, их определяющие. Разработана схема иерархических связей параметров окружающей среды с концентрацией растворенного радиоактивного газа. Предложена модель прогнозирования концентрации растворенного радона в источниках подземных вод, составляющих опорную мониторинговую сеть.

**Практическая значимость.** Кроме рассмотрения фундаментальных вопросов гидрогеохимии, проведенное исследование представляют основу для решения серии прикладных задач, актуальных для Прибайкалья. Среди них поиск лечебных вод для организации здравниц и курортно-медицинских учреждений, оценка качества питьевой воды в районах с повышенным содержанием радона в породном массиве, а также выявление эманационных предвестников сильных землетрясений, генерируемых разломами Байкальского рифта.

**Соответствие диссертации паспортам научных специальностей.** Диссертационная работа представляется по двум научным специальностям: 25.00.03 – «Геотектоника и геодинамика», а также 25.00.07 – «Гидрогеология».

Согласно паспорту научной специальности 25.00.03, диссертация соответствует пункту № 9 и частично пункту № 5. Так, в работе рассматриваются особенности выделения разломных зон Байкальского рифта в поле эманаций радона, что подпадает под пункт № 9: «Региональная геотектоника, основанная на выделении и изучении тектонических объектов того или иного региона, страны, континента, океанического или морского бассейна». В работе предпринимается попытка связать неоднородность распределения концентраций радиоактивного газа с положением и структурными особенностями новейших разрывов, отчетливо выраженных в рельефе, что

соответствует пункту № 5: «Неотектоника, изучающая тектонические явления новейшего этапа развития литосферы и использующая для этого свои специфические методы исследования».

Согласно паспорту научной специальности 25.00.07, работа соответствует трем пунктам: пункту № 3 («Условия и процессы формирования вещественного состава подземных вод (химического, газового, изотопного, бактериального)»), так как в ней рассматриваются факторы формирования изотопного состава подземных вод; пункту № 7 («Гидрогеохимические методы поисков месторождений полезных ископаемых (рудных, нефтегазовых)»), так как в ней обсуждается вопрос пространственной приуроченности подземных вод с повышенными концентрациями радиоактивного газа к урановорудным районам; пункту № 11 («Гидрогеологический мониторинг геологической среды с целью контроля и оценки ее экологического состояния»), так как представленное исследование базируется на результатах анализа шестилетних рядов мониторинга радона в источниках подземных вод, находящихся на селитебной территории Южного Приангарья.

**Личный вклад.** Работы по теме диссертации проведены лично автором, начиная от отбора проб, полевых и лабораторных измерений и заканчивая обработкой и интерпретацией полученных результатов.

**Апробация результатов работы.** Основные результаты диссертационной работы докладывались и обсуждались на 17 международных, всероссийских, региональных симпозиумах и конференциях: IX Международная школа-семинар «Физические основы прогнозирования разрушения горных пород» (г. Иркутск, 2013 г.); Всероссийский симпозиум с международным участием «Континентальный рифтогенез, сопутствующие процессы» (г. Иркутск, 2013 г.); VIII Косыгинские чтения «Тектоника, глубинное строение и минерагения Востока Азии» (г. Хабаровск, 2013 г.); Всероссийское совещание с участием приглашенных исследователей из других стран «Всероссийская научно-техническая конференция Института недропользования ИрГТУ» (г. Иркутск, 2013 г.; 2014 г.); Всероссийское совещание «Разломообразование в литосфере и сопутствующие процессы: тектонофизический анализ» (г. Иркутск, 2014 г.); X Российско-Монгольская конференция по проблемам астрономии и геофизики «Солнечно-Земная физика и сейсмогеодинамика Байкало-Монгольского региона» (Монголия, г. Улан-Батор, 2014 г.); XXVI Всероссийская молодежная конференция «Строение литосферы и геодинамика» (г. Иркутск, 2015 г.); Международная конференция «Геолого-геофизическая среда и разнообразные проявления сейсмичности» (г. Нерюнгри, 2015 г.); XX Международный симпозиум имени академика М.А. Усова «Проблемы геологии и освоения недр» (г. Томск, 2016 г.); III Всероссийское совещание и II Всероссийская молодежная школа по современной геодинамике «Современная геодинамика Центральной Азии и опасные природные процессы: результаты исследований на количественной основе» (г. Иркутск, 2016 г.); IV тектонофизическая конференция ИФЗ РАН «Тектонофизика и актуальные вопросы наук о Земле» (г. Москва, 2016 г.); V Международная конференция молодых ученых и специалистов памяти академика А.П. Карпинского (г. Санкт-Петербург, 2017 г.); IV Всероссийская конференция с международным участием «Триггерные эффекты в геосистемах» (г. Москва, 2017 г.); XXVII Всероссийская молодежная конференция с участием исследователей из других стран «Строение литосферы и геодинамика» (г. Иркутск, 2017 г.); XXII Всероссийское совещание по подземным водам Сибири и Дальнего Востока (г. Новосибирск, 2018 г.); Всероссийская конференция молодых ученых «Современные проблемы геохимии» (г. Иркутск, 2018 г.).

**Публикации.** По теме диссертации автором лично и в соавторстве опубликовано 24 работы, в том числе 8 статей в российских рецензируемых журналах, включенных в перечень ВАК Минобрнауки России.

**Структура диссертации и объем.** Диссертационная работа состоит из введения, четырех глав и заключения общим объемом 170 страниц печатного текста, в том числе 38 рисунков и 9 таблиц. Список использованной литературы включает 187 наименований.

**Благодарности.** Автор благодарен своему научному руководителю к.г.-м.н. С.А. Борнякову за помощь в проведении исследований и подготовке диссертационной работы. Отдельная благодарность выражается зав. лабораторией тектонофизики, д.г.-м.н.

К.Ж. Семинскому за всестороннюю помощь на всех этапах работы, а также к.г.-м.н. А.И. Мирошниченко за действенные советы при проведении исследований методами математической статистики, д.г.-м.н. С.В. Рассказову за плодотворное сотрудничество, к.г.-м.н. С.Х. Павлову за ценные советы, касающиеся гидрогеологического аспекта работы, и А.И. Оргильянову за консультации и помощь при проведении химических анализов воды. Кроме того, автор искренне благодарен сотрудникам полевого отряда лаборатории тектонофизики за помощь в сборе полевого фактического материала.

## **Глава 1. АНАЛИЗ ЛИТЕРАТУРНЫХ ДАННЫХ ПО ПРОБЛЕМЕ ИССЛЕДОВАНИЯ**

В первой части главы приведены общие сведения о радоне и разнородных факторах, оказывающих влияние на формирование и флуктуации эманационного поля. Вторая часть посвящена современному состоянию проблемы изучения радоновой активности в пределах Байкальского рифта.

### **1.1. Обзор литературных данных по проблеме изучения радона и закономерностей формирования поля его эманаций в окружающей среде**

Исследование радона в окружающей среде проводится с момента открытия этого изотопа в 1900 г. Среди отечественных специалистов наибольшее внимание проблеме изучения радоновой активности в окружающей среде уделили следующие исследователи: Абалаков А.Д., Абдувалиев А.К., Бобров А.А., Бобров В.А., Войтов Г.И., Гудзенко В.В., Дубинчук В.Г., Коваль П.В., Козлова И.К., Кокарев А.А., Копылова Г.Н., Маренный А.М., Мельникова О.С., Микляев П.С., Мясников А.А., Невинский И.О., Непомнящих А.И., Петрова Т.Б., Рудаков В.П., Самович Д.А., Спивак А.А., Семинский К.Ж., Старик И.Е., Султанхаджаев А.Н., Уткин В.И., Фирстов П.П., Цветкова Т.В., Цапалов А.А., Черняго Б.П., Юрков А.К. и др. Обзоры зарубежных работ, относящихся к данному направлению исследований, представлены в статьях следующих авторов: Бауброн Ж.К. (Baubron J.C.), Бриттон Дж. (Britton J.), Войт Х. (Woith H.), Гош Д. (Ghosh D.), Деб А. (Deb A.), Чжан В. (Zhang W.), Чжан Ч. (Zhang Z.), Имме Г. (Imme G.), Кинг Ч.Ю. (King C.Y.), Морелли Д. (Morelli D.), Сенгупта Р. (Sengupta R.), Тутен Ж.П. (Toutain J.P.), Цицерон Р. (Cicerone R.), Эбель Дж.Э. (Ebel J.E.) и др.

К настоящему времени выявлены основные факторы формирования эманационного поля, среди которых выделяют внутренние (геологические, гидрогеологические и геодинамические) и внешние (космогенные и метеорологические). Пространственно-временные флуктуации этого поля в пределах отдельно взятого участка и в планетарном масштабе определяются комплексным воздействием вышеперечисленных факторов. Однако их вклады и иерархическая соподчиненность разными исследователями описываются по-разному. В одних работах к основным факторам относят внешние, то есть атмосферное давление, температуру и влажность воздуха, а в других главными считаются внутренние – состав пород, степень трещиноватости, обводненность участка и геодинамическая активность региона. В настоящее время существует несколько моделей, определяющих иерархию факторов формирования эманационного поля и степень их влияния на интенсивность выделения радона. К общим закономерностям формирования поля эманаций, отмечаемым большинством авторов, относятся его зависимость от химического состава пород, повышение интенсивности эманаций в зонах влияния крупных разрывных нарушений, а также улучшение миграционной способности радона в пределах обводненных массивов горных пород.

В последние годы в мировой литературе доминируют исследования флуктуаций радонового поля во времени. В существенной степени они представляют попытки расшифровать хаотичный, на первый взгляд, характер колебаний объемной активности радона с целью обнаружить эманационные предвестники землетрясений. В настоящее время доказанным является то, что эманационное поле реагирует практически на любые изменения в окружающей среде. Выделяют колебания периодического типа (например, под влиянием суточных и сезонных изменений метеорологических условий) и не периодического характера (например, под влиянием вспышек в хромосфере Солнца или изменений напряженного состояния земной коры при подготовке сейсмических событий). Наряду с этим существуют определенные противоречия

результатов исследований разных авторов, которые объясняются: во-первых, отличиями в климатических условиях и геолого-структурных обстановках районов проведения работ; во-вторых, отличиями в организации и проведении самих исследований (продолжительность мониторинга, плотность сети наблюдений, инструментально-методическая основа исследований).

### 1.2. Краткая геологическая характеристика Байкальского рифта

Геологическое строение тектонической впадины оз. Байкал определяется ее положением в обширном регионе сочленения мегаструктур, существенно отличающихся по истории геологического развития. На территории России ими являются южный выступ Сибирской платформы, Саяно-Байкальский складчатый пояс и западная часть Забайкальской складчатой области. Кайнозойская активизация рассматриваемой территории привела к масштабным перемещениям по серии крупных разломов на северо-западе Монголии и возникновению Байкальской рифтовой зоны, центральное звено которой представлено одноименным рифтом.

Обобщение сведений о новейшей тектонике, а также главных закономерностей эволюции Байкальского рифта было проведено и описано предшественниками [Борняков, Шерман, 2000; Зорин, Турутанов, 2005; Крылов и др., 1981; Кулаков, 1999; Леви и др., 1997; Логачев, 2003; Логачев и др., 2000; Мац и др., 2001; Рассказов, 1993; Ружич, 1997; Саньков и др., 1991; Семинский, Радзиминович, 2007; Шерман, Днепровский, 1989; Delvaux et al., 1997; Ivanov et al., 2015; Petit, Deverchere, 2006]. Согласно цитированным работам, Байкальская рифтовая зона является одной из наиболее активных областей Центральной Азии, так как в ее пределах на современном этапе тектогенеза происходит взаимодействие двух крупных литосферных плит – Евразийской и Амурской. Как следствие, для рассматриваемой территории характерны высокая сейсмичность, повышенный тепловой поток и активная флюидодинамика, наиболее интенсивные проявления которых приурочены к зонам разломов земной коры.

Согласно схеме гидрогеологического районирования [Ломоносов, Кустов, Пиннекер, 1977], изучаемая территория располагается в пределах двух гидрогеологических областей. Первой из них является Восточно-Сибирская гидрогеологическая платформенная область, а второй – Восточно-Сибирская гидрогеологическая складчатая область, которая занимает всю площадь республики Бурятия.

### 1.3. Изученность эманационного поля в пределах Байкальского рифта

Массовое опробование водопроявлений на территории Байкальского региона началось в составе площадных гидрогеологических исследований, которые проводились с целью изучения гидроминеральных ресурсов Восточной Сибири [Минеральные воды южной ... , 1961]. В рамках этих комплексных работ измерялась объемная активность радона ( $Q$ , Бк/л), растворенного в воде. Так была получена наиболее общая информация о количественном содержании радиоактивного газа в подземных водах и пространственном распределении источников, отличающихся по радиоактивности. При этом главный интерес представляли водопроявления, относящиеся, согласно существующей в России классификации, к собственно радоновым ( $Q \geq 185$  Бк/л).

Исследования последних лет отличаются комплексным характером, предполагающим, наряду с водоисточниками, определение содержания радона в надпочвенном и почвенном воздухе. Широкомасштабными площадными исследованиями установлено, что концентрация радона в Прибайкалье в целом ниже, чем в Забайкалье [Мясников и др., 2009]. Для разломов Байкальского рифта характерны сложные по форме аномалии почвенного радона, что объясняется спецификой строения сетей разрывов 2-го порядка и их неравномерной активностью [Бобров, 2010; Коваль и др., 2006]. Показано [Плюснин, 2009], что в крупных разломах Забайкалья могут формироваться эманулирующие коллекторы, с которыми связаны радоновые воды.

В настоящее время комплексное опробование на радон осуществляется на базе Иркутской экспериментальной площадки в рамках общероссийской программы, целью которой является установление общих закономерностей формирования поля радона в геологической среде [Маренный и др., 2016]. При этом режимные наблюдения за измерениями параметра  $Q$  во времени на территории Восточной Сибири производились только в курортно-медицинских учреждениях,

что обусловлено необходимостью контроля качества лечебных вод при эксплуатации радоновых источников. Вследствие узко прикладной направленности этих измерений, всесторонний анализ длинных временных рядов проведен не был. Исследования прогностической направленности с целью поиска эманационных предвестников сильных землетрясений начаты в Прибайкалье сравнительно недавно [Лопатин, 2015]. Однако до сих пор практически не изучены общие закономерности эманаций и определяющие их главные факторы.

## **Глава 2. МЕТОДИЧЕСКАЯ ОСНОВА ИССЛЕДОВАНИЙ И ОБЩАЯ ХАРАКТЕРИСТИКА ФАКТИЧЕСКОГО МАТЕРИАЛА**

Работы, проведенные в рамках представленных в диссертации исследований, делятся на две основные группы. К первой относится сбор в полевых условиях фактического материала согласно принятым методическим подходам. К способам получения оригинальных данных относятся профильная радиометрическая съемка на отдельных участках Байкальского рифта и мониторинговые исследования источников подземных вод в Южном Приангарье. Определения параметра  $Q$  в пробах воды производились с помощью портативных радиометров радона РРА-01М-03 и Камера-01. Совместно с прибором Камера-01 использовался компрессор и устройство для барботажа, необходимые для выделения радона из пробы воды. Замеры серии параметров для проб воды – температуры ( $T_{\text{пв}}$ ), жесткости ( $TDS$ ), проводимости ( $EC$ ) и водородного показателя ( $pH$ ) – осуществлялись с помощью экспресс  $pH$ -метра Hanna HI 98129 Combo.

Вторую группу исследований составили камеральные работы: статистический анализ полевых измерений, сбор и систематизация дополнительной информации из литературных источников [Власов и др., 1962; Мясников и др., 2009], а также баз метеорологических и сейсмологических данных, находящихся в свободном доступе. Среди статистических методов обработки информации использовались различные виды систематизации, визуализации и анализа, в том числе кластерный, корреляционный и Фурье.

Общий объем количественной информации, положенной в основу диссертационной работы, включает данные о параметре  $Q$  для 333 водопунктов. Ряды, сформированные в ходе мониторинга, содержат численную информацию по восьми источникам подземных вод за шестилетний период режимных наблюдений (более 1000 замеров), а также данные о серии гидрохимических показателей и параметров окружающей среды. Однородность представленного в работе материала обеспечена тем, что сбор информации производился по единой методике, а привлекаемые из литературных источников результаты измерений других авторов, характеризовались удовлетворительной сходимостью с данными оригинальных исследований.

## **Глава 3. ПРОСТРАНСТВЕННЫЙ АСПЕКТ ФОРМИРОВАНИЯ ЭМАНАЦИОННОГО ПОЛЯ В ПРЕДЕЛАХ БАЙКАЛЬСКОГО РИФТА**

Площадное радиометрическое обследование водопроявлений на территории Байкальского рифта осуществлялось на трех уровнях детальности (рис. 1, вкладка): 1) в мелком масштабе для Байкальского региона в целом; 2) в среднем масштабе для профилей Баяндай – Мухоршибирь и Иркутск – Слюдянка; 3) в крупном масштабе для отдельных участков исследуемой территории. Анализ пространственных закономерностей распределения подземных вод с различным содержанием радона предшествовала их систематизация по значению параметра  $Q$ .

### **3.1. Классификация источников подземных вод по содержанию радона**

Анализ массива опробований позволил классифицировать водопроявления по концентрации радона на 7 групп. Объективной основой для группирования послужили диаграммы распределений параметра  $Q$  (см. вкладку). Традиционные гистограммы (рис. 2, Б, Г, вкладка) анализировались совместно с графиками, на которых значения  $Q$  располагались в порядке возрастания (рис. 2, А, В, вкладка). Минимумы на диаграммах первого типа и перегибы графика на диаграммах второго типа являлись границами, отделяющими группы водопроявлений с близким содержанием радона.



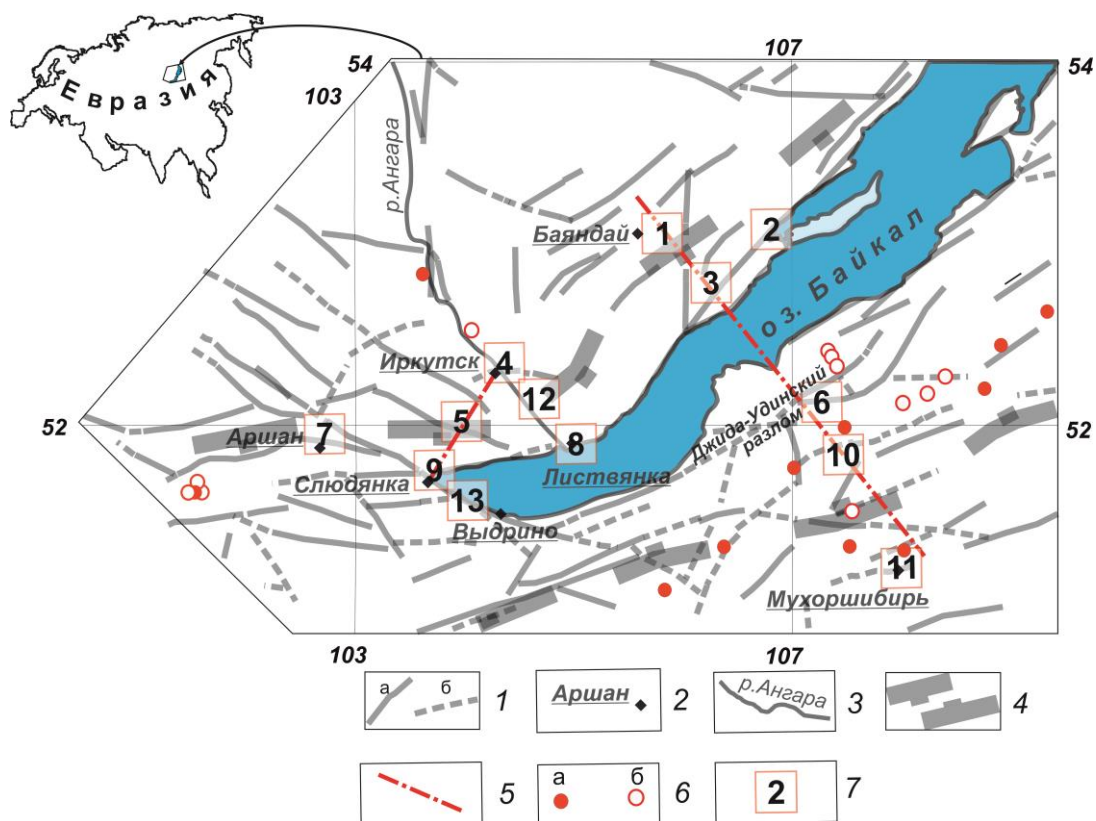


Рис. 1. Схема расположения участков работ.

1 – разломы, отчетливо (а) и менее отчетливо (б) выраженные в рельефе; 2 – населенные пункты; 3 – русло р. Ангары; 4 – границы Байкальского рифта; 5 – положение трансектов Баяндай – Мухоршибирь и Иркутск – Слюдянка; 6 – места единичного отбора проб: литературные данные (а), полевые исследования (б); 7 – пронумерованные участки детального опробования.

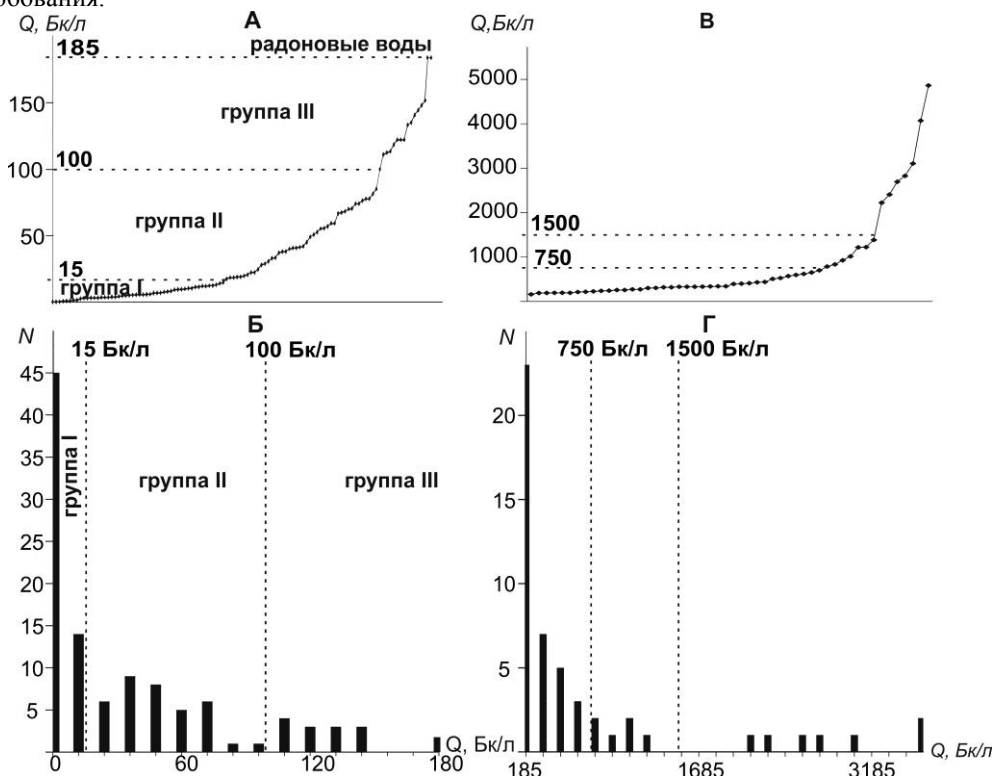
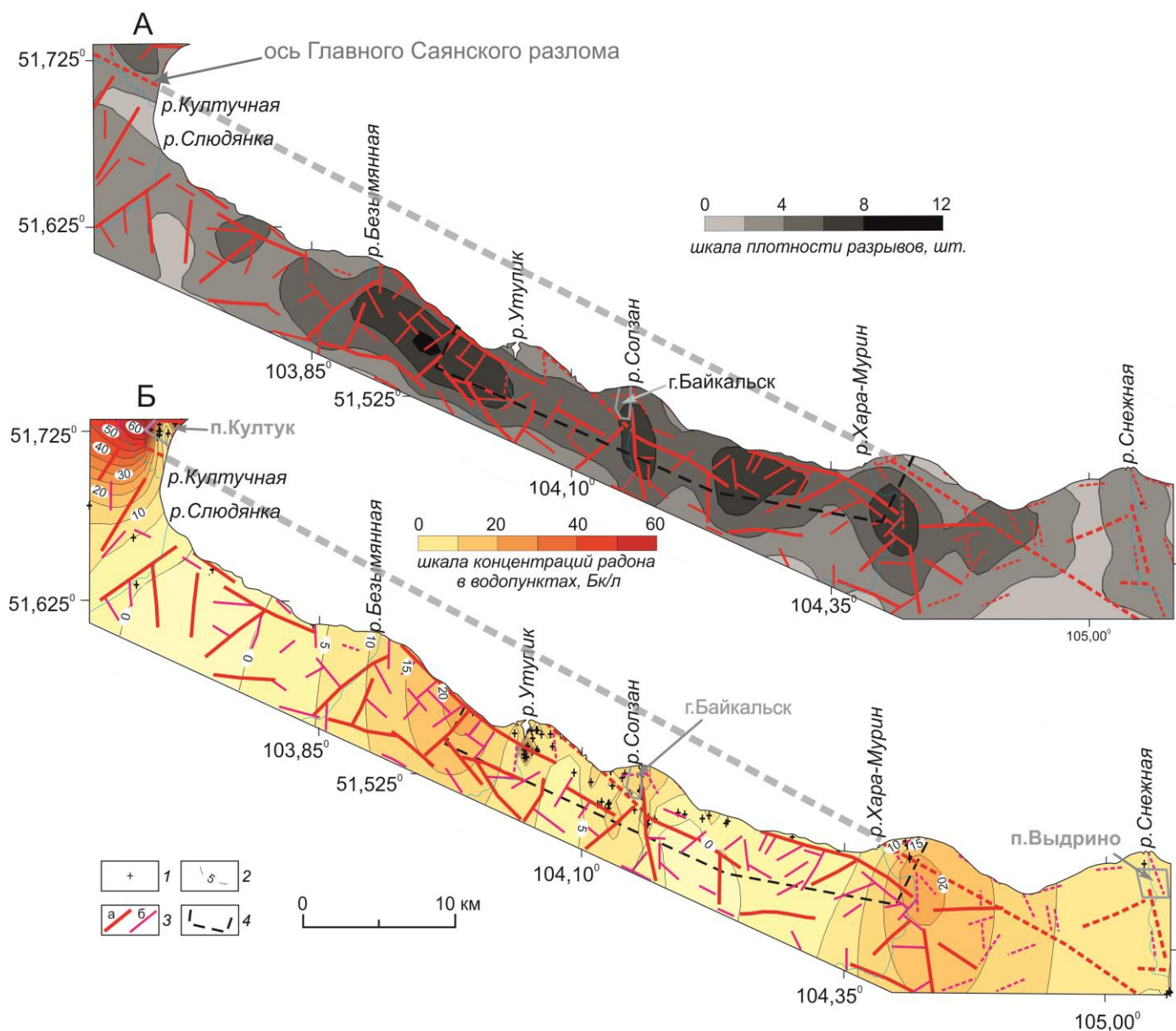


Рис. 2. Диаграммы, позволяющие разделить водопрооявления Байкальского рифта на группы по содержанию радона ( $Q$ ).

Пунктир – граничные уровни параметра  $Q$ . А, В. Графики распределения содержаний радона в водопрооявлениях с  $Q \leq 185$  Бк/л (А) и водопрооявлениях с  $Q \geq 185$  Бк/л (В), на которых значения  $Q$  расположены в порядке возрастания через одинаковые расстояния по оси абсцисс. Б, Г. Гистограммы распределения  $Q$ , построенные для водопрооявлений с  $Q \leq 185$  Бк/л (Б) и водопрооявлений с  $Q \geq 185$  Бк/л (Г) ( $N$  – частота встречаемости значений  $Q$ ).



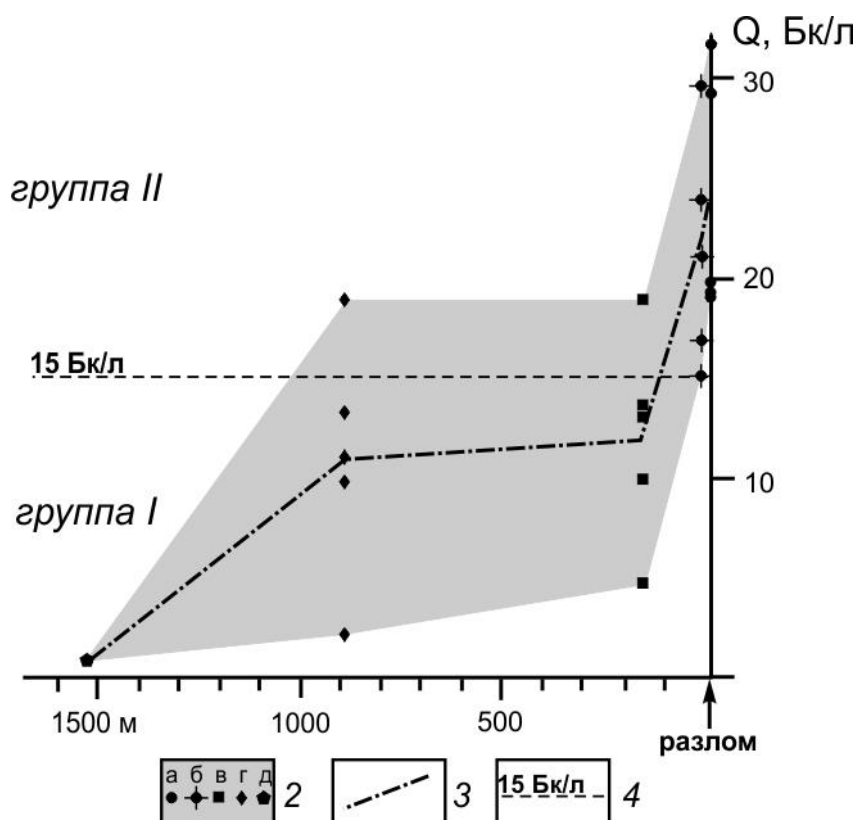


Рис. 4. Вариации содержания радона ( $Q$ ) в источниках подземных вод, располагающихся в лежащем крыле Тункинского сброса (окрестности пос. Аршан на юго-западном фланге Байкальского рифта).

Величина  $Q$  измерялась несколько раз в течение 2 месяцев для пяти источников, располагающихся на разных расстояниях от разлома. 1 — область вариаций содержания радона, оконтуренная по предельным величинам  $Q$ , которые были измерены в разное время для источников с индексами 1 (а), 2 (б), 3 (в), 4 (г) и 5 (д); 2 — график средних значений  $Q$ , зафиксированных в источниках за весь период измерений; 3 — уровень, разделяющий на графике величины параметра  $Q$ , соответствующие подземным водам из двух разных по содержанию радона групп.

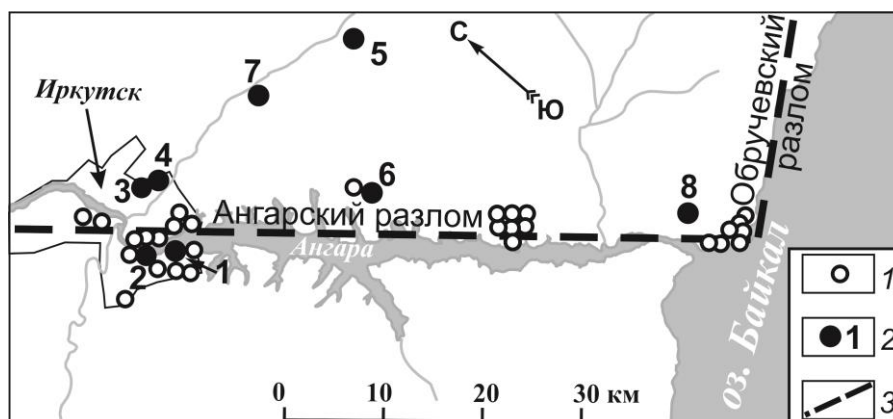


Рис. 5. Схема расположения опробованных водопроявлений на территории Южного Прибайкалья.

1 — опробованные источники; 2 — источники, вошедшие в мониторинговую сеть с их порядковыми номерами; 3 — осевые линии крупных разломных зон.

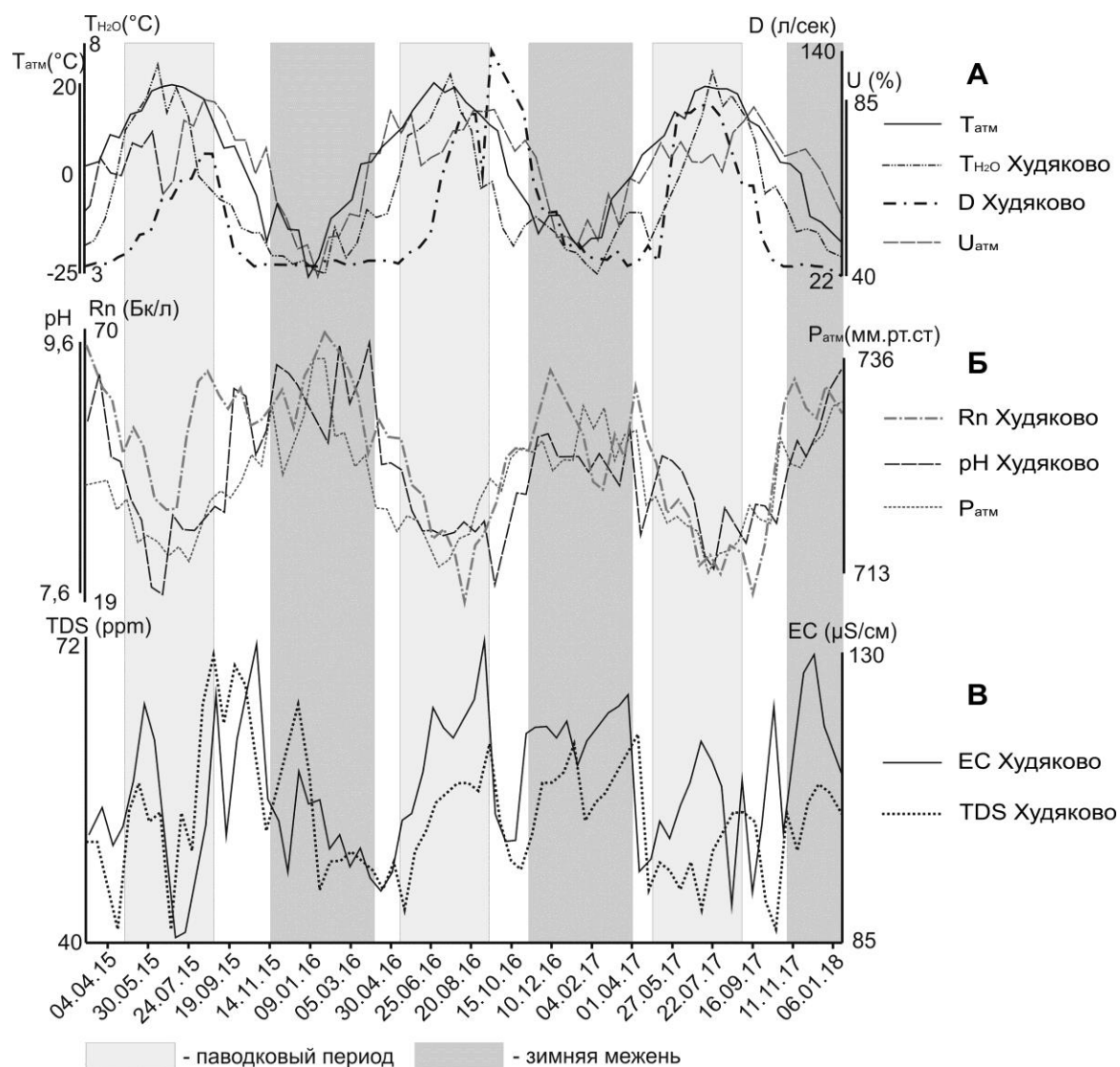


Рис. 6. Графики колебаний изучаемых параметров во времени для источника «Худяково»:

А – группа параметров, достигающих максимальных значений в паводковые периоды; Б – группа параметров, достигающих максимальных значений в меженные периоды; В – группа параметров, не имеющих очевидной зависимости от времени года.

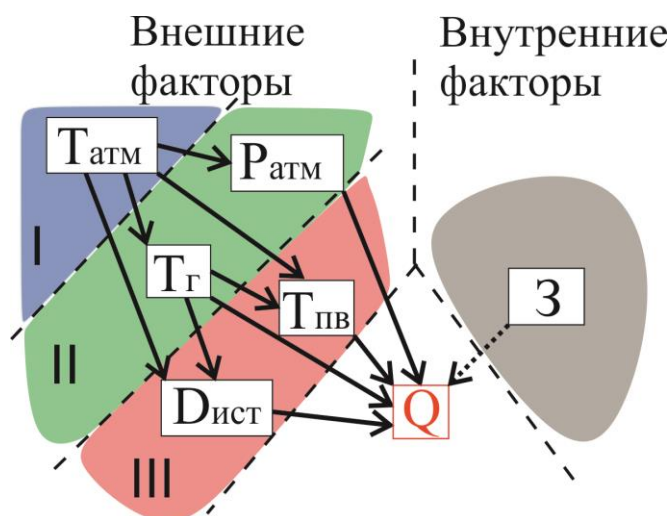


Рис. 7. Иерархическая схема связей факторов, оказывающих влияние на радиоактивность подземных вод:

$T_{\text{атм}}$  – температура атмосферного воздуха;  $T_{\text{г}}$  – температура вмещающих пород;  $P_{\text{атм}}$  – атмосферное давление;  $D_{\text{ист}}$  – дебит источника;  $T_{\text{пв}}$  – температура подземных вод;  $З$  – сейсмические события различного энергетического класса;  $Q$  – объемная активность радона, растворенного в подземных водах; I–III – ступени иерархических связей.

Согласно результатам проведенного анализа, на данном этапе исследований в Байкальском регионе выделяются следующие группы водопроявлений: 1) менее 15 Бк/л; 2) 16 – 99 Бк/л; 3) 100 – 184 Бк/л; 4) 185 – 750 Бк/л (очень слаборадоновые); 5) 750 – 1500 Бк/л (слаборадоновые); 6) 1500 – 7500 Бк/л (радоновые средней концентрации); 7) более 7500 Бк/л (высокорадоновые). Четыре (IV-VII) из семи групп относятся к собственно радоновым водам и выделялись для российских регионов ранее. Существование трех первых групп обосновано впервые.

В пределах Байкальского рифта и смежных территорий к группе I относится 41.5%, к группе II – 43.8% и к группе III – 14.7% опробованных источников. Содержание радона в половине водопроявлений из группы I составило не более 4 Бк/л, что является уровнем атмосферного фона и свидетельствует об отсутствии взаимосвязи этих приповерхностных вод с водами более глубокого формирования. Водопроявления второй группы в силу доминирования на исследуемой территории могут быть основой для организации разветвленной сети мониторинговых исследований. Источники из третьей группы также пригодны для подобных работ, однако в пределах рассматриваемого региона они встречаются сравнительно редко.

### 3.2. Результаты исследований в мелком масштабе

Мелкомасштабная площадная радонометрическая съемка позволила установить закономерности распространения радоновых и нерадоновых ( $Q < 185$  Бк/л) вод на изученной территории. Так, Прибайкалье является зоной распространения вод с относительно низким содержанием  $^{222}\text{Rn}$ , отделяющей области проявления радоновых вод, которые представляют северо-западную и юго-восточную части изучаемого региона (рис. 1, вкладка). При этом во внутренних районах Сибирской платформы выявлено всего пять таких водопроявлений, а в Забайкалье – десятки радоновых источников. Описанные закономерности подтверждают на большем объеме фактического материала известный вывод о меньшей в целом концентрации  $^{222}\text{Rn}$  в водах и почвах Прибайкалья по сравнению с Забайкальем. Согласно материалам по ураноносности Восточной Сибири, в южной и юго-восточной частях исследуемого региона располагаются промышленные, резервные и потенциально урановорудные районы (например, поле «Маяк»), большая часть которых приурочено к гранитоидным комплексам. Таким образом, отмеченная специфика в распределении радиоактивных вод обусловлена широким распространением в Забайкалье интрузивных пород с повышенными и аномальными содержаниями урана.

### 3.3. Результаты исследований в среднем масштабе

Среднемасштабные исследования детализируют установленную закономерность на примере трансектов Баяндай – Мухоршибирь и Иркутск – Слюдянка (рис. 1, вкладка).

Первый профиль пересекает одну из областей Байкальского региона, отличающуюся сложным геологическим строением. Так, его северо-западная часть находится в пределах стабильной Сибирской платформы, центральная – на территории сейсмически активного Байкальского рифта, а юго-восточная относится к слабоактивной части Саяно-Байкальского складчатого пояса. Граница распространения радоновых вод, связанных с развитием забайкальских гранитоидов, выделяется к юго-востоку от активных тектонических структур центральной части Байкальского рифта. Она приурочена к Джида-Удинскому разлому, юго-восточнее которого большинство водопроявлений принадлежит к группе II, причем три источника являются радоновыми. На участках, расположенных севернее Джида-Удинского разлома, воды также относятся к двум группам, причем за редким исключением – это группы I и II. Показательно, что с рассматриваемым разломом связана граница между Байкальской провинцией азотных и метановых термальных вод и Забайкальской провинцией холодных углекислых вод, выделяющихся в Байкальском регионе. Таким образом, определяющая роль вещественного фактора для формирования геохимического состава подземных вод в данном случае распространяется и на содержание радиоактивного газа.

Профиль Иркутск – Слюдянка характеризуется меньшей длиной, но, как и первый трансект, пересекает основные тектонические структуры исследуемого региона (рис. 1, вкладка). Так, его



северная часть принадлежит к сравнительно стабильной территории Сибирской платформы, а центральная и южная части находятся в зоне влияния сейсмически активного Байкальского рифта, причем южная оконечность профиля пересекает границу, отделяющую кратон от Саяно-Байкальского складчатого пояса. Источники подземных вод в пределах трансекта Иркутск – Слюдянка по концентрации растворенного радона за небольшим исключением относятся к группам I и II. Водопроявления из первой группы представляют большинство опробованных источников и отражают фоновую концентрацию для рассматриваемой территории. Водопункты, из второй или третьей групп, встречаются реже и обычно их появление, как и для трансекта Баяндай – Мухоршибирь, связано со структурным фактором формирования радонового поля.

Так, в Прибайкалье водопроявления с относительно высокой для рассматриваемой территории концентрацией растворенного радона (группа II) принадлежат к Прибайкальской флекуре, а также зонам Прихребтового и Обручевского разломов. В Забайкалье участки пересечения траснекта Баяндай – Мухоршибирь с зонами крупных Джиды-Удинского и Тугнуй-Кондинского разломов маркируются присутствием собственно радоновых вод (группа IV), тогда как водопроявления из группы II здесь относятся к фоновым. Таким образом, в Забайкалье отчетливо проявляется совместное воздействие структурного и вещественного факторов формирования эманационного поля, повышающее базовый уровень радиоактивности подземных вод по сравнению с Прибайкальем.

### 3.4. Результаты исследований в крупном масштабе

Детализация исследований радоновой активности обводненных разломов Байкальского рифта проводилась на тринадцати полигонах Южного Прибайкалья (рис. 1, вкладка). В качестве главного из них было выбрано побережье оз. Байкал на отрезке пос. Култук – пос. Выдрино (№ 13 на рис. 1; рис. 3, вкладка) близ трансекта Иркутск – Слюдянка. Уплотнение сети опробований рядом с трансрегиональным профилем № 2 обуславливается некоторыми преимуществами перед территориями, смежными с трансектом № 1. Среди них типовая геохимическая обстановка и невысокий уровень радоновой активности в приповерхностном почвенном слое (10 Бк/л), что позволяет судить о низком содержании урана в горных породах. Вторым преимуществом, является то, что описываемая территория находится в пределах одной гидроминеральной провинции (Байкальская область азотных и метановых терм), и, следовательно, обладает однородными гидрогеохимическими параметрами, которые сравнительно стабильно проявляются на всей площади полигона крупномасштабной радоновой съемки.

В описанных условиях повышенное содержание радона в источниках подземных вод должно определяться не вещественным, а структурным фактором. Согласно результатам парагенетического анализа разломной и трещинной сети на участке пос. Култук – пос. Выдрино, этот фактор определяется строением крупнейшей в регионе зоны Главного Саянского разлома, отрезок которой представляет юго-западный борт Южно-Байкальской котловины (рис. 3, вкладка). Из схемы (рис. 3, Б, вкладка), составленной по результатам опробования 74 водопроявлений следует, что распределение параметра  $Q$  на участке пос. Култук – пос. Выдрино характеризуется явно выраженной неравномерностью. Она проявляется в чередовании вдоль побережья озера участков с практически полным отсутствием радона в подземных водах и областей с его аномальными концентрациями ( $Q > 15$  Бк/л). В первом приближении такие аномалии располагаются в окрестностях устьев рек Хара-Мурын, Солзан, Утулик, Култучная, а также в междуречье рр. Безымянная и Утулик. Как видно из рис. 3, А (вкладка), эти участки пространственно совпадают с максимумами плотности новейших разломов, которые, таким образом, предопределяют наличие продольной неравномерности распределения радиоактивности подземных вод в зоне динамического влияния Главного Саянского разлома.

Результаты исследований пространственного распределения подземных вод с различным содержанием радона в зонах разнотипных разломов Прибайкалья (Ангарского, Джиды-Удинского и др.), изученных в пределах серии небольших полигонов (рис. 1, вкладка), иллюстрируются здесь на примере участка № 7. Он удобен для рассмотрения тем, что пять опробованных источников образуют поперечный профиль, протягивающийся на 1.5 км в лежащее крыло Тункинского сброса,

который выражен на участке крутым уступом. Результаты измерений показали, что область главного разломного сместителя (пункты 1 и 2) отличается наиболее высокими значениями  $Q$  (рис. 4, вкладка), соответствующими группе II по предложенной ранее классификации. По мере удаления в крыло Тункинского сброса радиоактивность подземных вод уменьшается до минимальных значений  $Q$  (пункты 3, 4 и 5). Общий тренд (штрих-пунктирная линия) подтверждает принадлежность этих водопроявлений к группе I, а также свидетельствует о неравномерном уменьшении величины  $Q$ , которая от  $\approx 30$  Бк/л у сместителя падает практически до нуля в источнике, наиболее удаленном от разлома.

#### Глава 4. ВРЕМЕННОЙ АСПЕКТ ФОРМИРОВАНИЯ ЭМАНАЦИОННОГО ПОЛЯ В ПРЕДЕЛАХ БАЙКАЛЬСКОГО РИФТА

Для выявления главных закономерностей колебания радонового поля во времени были организованы режимные наблюдения. Они состояли в периодическом опробовании источников подземных вод, составляющих опорную сеть мониторинга в Южном Приангарье, а также в эпизодических измерений параметра  $Q$  для серии приразломных водопроявлений на окружающих территориях.

##### 4.1. Организация мониторинговых исследований

Рекогносцировочное опробование нескольких десятков источников подземных вод, располагающихся на территории Южного Прибайкалья (рис. 5, вкладка), позволило выбрать восемь водопунктов, отвечающих главным требованиям, предъявляемым к объектам мониторинга: 1) концентрация радона  $16 \leq Q \leq 99$  Бк/л; 2) наличие незастойного режима водообмена и малого доступа атмосферных газов к подземным водам; 3) круглогодичное функционирование; 4) приуроченность к бортам долин разломного происхождения.

Территория расположения этих, составляющих опорную сеть водопроявлений, включает г. Иркутск, а также окружающие селитебные земли на правом берегу Иркутского водохранилища, в пределах которых подземные воды используются для промышленного и питьевого водоснабжения. Район принадлежит к зоне влияния крупного Ангарского разлома, непосредственно связанного с сетью разрывов Байкальского рифта.

Массив числовых данных, кроме информации об объемной активности радона, включает физико-химические параметры опробуемых водопроявлений, метеорологические характеристики окружающей среды, а также данные о сейсмической активности в регионе.

##### 4.2. Статистический анализ полученных данных

В целом, согласно принятой классификации, подземные воды изучаемого района являются нерадоновыми ( $Q \leq 185$  Бк/л). Уровень фона у большинства опробованных водопроявлений составил  $\approx 4$  Бк/л, однако в источниках, вошедших в опорную сеть мониторинга, концентрация радона превышает фоновые значения в десятки раз. Кроме того, было установлено, что по изучаемым физико-химическим характеристикам исследуемые воды относятся к холодным ( $T(\text{ист.}) < 20$  °С) и нейтральным ( $7 < pH < 11$  (предел измерений экспресс  $pH$ -метра – от 1 до 14)) с показателями жесткости от «очень жесткой» ( $^{\circ}Ж \approx 8$ ) воды в источнике «Колхозная» до «мягкой» ( $^{\circ}Ж \approx 0.9$ ) – в источнике «Худяково».

Средние содержания растворенного радона, рассчитанные для периода мониторинга, позволяют разделить изучаемые водопункты на три группы: 1-я (I) –  $Q_{\text{ср}} \approx 15$  Бк/л; 2-я (II<sub>1</sub>) –  $Q_{\text{ср}} \approx 30$  Бк/л; 3-я (II<sub>2</sub>) –  $Q_{\text{ср}} \approx 60$  Бк/л.

Кроме абсолютных значений параметра  $Q$ , графики его вариаций во времени, построенные для источников из разных групп, характеризуются определенными отличиями, что может быть связано с различием в условиях питания подземных вод. Источники из первой группы, по-видимому, получают воду из поверхностного стока и практически не имеют связи с глубинными водами: для них характерно хаотичное изменение значений  $Q$ , причем в некоторые периоды времени радон в этих источниках не фиксируется. Вторая группа источников формируется за счет подземных вод, приуроченных к разломам, и защищена от разбавления атмосферными осадками:

изменение параметра  $Q$  происходит постепенно, практически отсутствуют аномальные всплески, а уровень радоновой активности всегда выше атмосферного фона. Источники, принадлежащие к третьей группе, находятся в непосредственной близости от наиболее активных разрывных нарушений: в них также происходит постепенное изменение концентрации радона, но иногда фиксируются аномальные всплески содержания радиоактивного газа.

Анализ формы вариаций изучаемых параметров во времени показал (рис. 6, вкладка), что фиксируемые величины целесообразно разделить на три группы. К первой относятся характеристики, достигающие своих максимальных значений в теплые месяцы года, когда среднесуточная температура воздуха выше нуля (паводковые периоды). Минимальные значения данных параметров фиксируются в холодные месяцы (период зимней межени). В эту группу входят показатели атмосферной температуры и влажности, а также температуры воды и дебита водоисточников (рис. 6, А, вкладка). Обратная картина наблюдается у параметров второй группы, к которой относятся атмосферное давление, водородный показатель воды и количество растворенного радона (рис. 6, Б, вкладка). Максимальные значения здесь отмечаются в зимние месяцы, а минимальные – летом. Третью группу формируют характеристики жесткости и проводимости воды (рис. 6, В, вкладка), а также показатель сейсмической активности в регионе. Отличительной особенностью данной группы параметров является то, что их флуктуации не демонстрируют заметной зависимости от периода года.

Для исследования степени взаимозависимости рассматриваемых параметров использовался кластерный анализ, который позволил объединить их в три основные группы. Первую образуют параметры  $Q$  для разных источников, а вторую и третью – разнотипные факторы формирования эманационного поля: внешние (метеорологические условия) и внутренние (землетрясения разного энергетического класса). Степень влияния на эманации радона параметров из второго и третьего кластеров различна. Наиболее тесные межкластерные связи фиксируются между значениями  $Q$  и метеопараметрами, а наименее тесные – между величинами  $Q$  и энергетическим классом.

Количественная оценка рассматриваемых взаимосвязей была проведена на основе корреляционного анализа, коэффициенты которого представлены в таблице 1.

Табл. 1.

**Коэффициенты корреляции, рассчитанные для зависимостей содержания радона в 8 пунктах мониторинга от метеопараметров и энергетического класса наиболее сильного землетрясения ( $K$ ), произошедшего в день опробования на территории Байкальского рифта**

| № водопункта | $K$    | $T$    | $P$    | $U$    |
|--------------|--------|--------|--------|--------|
| 1            | - 0.01 | - 0.52 | 0.58   | - 0.01 |
| 2            | - 0.17 | 0.13   | - 0.11 | 0.24   |
| 3            | - 0.06 | - 0.42 | 0.54   | 0.17   |
| 4            | 0.19   | - 0.15 | 0.03   | - 0.05 |
| 5            | - 0.24 | - 0.71 | 0.83   | 0.12   |
| 6            | 0.10   | - 0.35 | 0.52   | - 0.19 |
| 7            | - 0.13 | - 0.44 | 0.39   | 0.30   |
| 8            | - 0.17 | - 0.61 | 0.76   | - 0.05 |

Примечание:  $T$  – температур воздуха,  $P$  – атмосферное давление,  $U$  – влажность воздуха.

Количество значений в выборке для всех случаев корреляционного анализа равно 20.

Как видно из табл. 1, зависимость величины  $Q$  от параметров  $K$  и  $U$  отсутствует. На уровне тенденций для большинства пунктов мониторинга имеет место связь содержания радона с величинами температуры воздуха и атмосферного давления, причем в первом случае она обратная, а во втором – прямая. Отрицательный результат коррелирования параметров  $Q$  и  $K$  для региона, частично относящегося к сейсмоактивному Байкальскому рифту, не свидетельствует об отсутствии влияния внутренних факторов на содержание радона в подземных водах рассматриваемой территории. Причина полученного результата может быть связана со сравнительно низкой сейсмической активностью региона в течение периода мониторинга.



#### 4.3. Иерархическая схема взаимных связей факторов, влияющих на флуктуации радонового поля во времени

На основе результатов проведенного анализа предложена схема иерархических связей изучаемых параметров (рис. 7, вкладка). Среди внешних факторов преобладающее влияние на концентрацию радона в водоисточниках оказывает температура атмосферного воздуха. На следующей ступени находится атмосферное давление, которое при неизменной высоте пункта опробования над уровнем моря зависит только от температуры воздуха. На той же ступени иерархии располагается температура грунта, находящаяся в прямой зависимости от температуры атмосферного воздуха. Температура грунта, в свою очередь, оказывает непосредственное влияние на температуру воды, а также на дебит конкретного источника посредством отсутствия питания подземных вод поверхностным стоком в период зимней межени.

Из эндогенных факторов, оказывающих влияние на колебания поля радона во времени, в предложенную схему вошел энергетический класс сейсмических событий  $K$ , произошедших на изучаемой территории в день опробования. Несмотря на отрицательный результат коррелирования параметров  $Q$  и  $K$  (табл. 1), косвенным подтверждением существования связи радоновой и сейсмической активности может служить снижение концентрации радона на 17% от стандартных значений после наиболее сильного землетрясения, произошедшего в период мониторинга на расстоянии 60 км от опорной сети (16.03.2018 г.;  $K=11.2$ ). Подобный «сценарий» свидетельствует об определенных перспективах поиска в Прибайкалье эманационных предвестников сильных землетрясений по примеру того, как это осуществляется в большинстве сейсмоактивных регионов мира.

#### 4.4. Прогнозные оценки концентраций радона в подземных водных объектах

Периодический характер колебательных изменений радоновой активности во времени предполагает возможность количественного прогнозирования данной величины для источников Южного Прибайкалья. С этой целью на основе массивов данных о флуктуациях параметра  $Q$ , полученных за шесть лет мониторинговых исследований, разработана прогностическая модель расчета концентрации растворенного в подземных водах радона. Прогнозное значение находится из формулы (1):

$$\frac{Q_1[\%]}{Q_2[\%]} = \frac{Q_{\text{факт}}[\text{Бк/л}]}{Q_{\text{расч}}[\text{Бк/л}]}, \quad (1)$$

где  $Q_1[\%]$  – среднее значение  $Q$  на месяц, когда был произведен фактический замер, в процентном соотношении от максимального;  $Q_2[\%]$  – среднее значение  $Q$  на месяц, для которого необходимо сделать прогноз, в процентном соотношении от максимального;  $Q_{\text{факт}}[\text{Бк/л}]$  – результат фактического измерения количества радона в воде;  $Q_{\text{расч}}[\text{Бк/л}]$  – искомое прогнозное значение.

Применение предложенной формулы позволило сделать прогноз для всех восьми пунктов мониторинга на год. Расчет производился на основе результатов единичного опробования. Количественный анализ теоретических и фактических данных показал, что сходимость прогноза в среднем составила 80%. Такой уровень достоверности теоретических расчетов подтверждает кондиционность разработанной модели.

### ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Комплексный анализ полученных результатов позволил сделать следующие основные выводы, характеризующие радоновую активность обводненных разломных зон Байкальского рифта и смежной платформенной территории.

1. Концентрация радона в подземных водах Байкальского региона изменяется в пределах от практически нулевых значений до первых тысяч беккерелей на литр, причем Прибайкалье является зоной распространения вод с относительно низким содержанием  $^{222}\text{Rn}$ , которая разделяет

области проявления радоновых вод в северо-западной и юго-восточной частях рассматриваемого региона.

2. По радиоактивности подземные воды делятся на 7 групп, причем в пределах Байкальского региона подавляющее большинство водопроявлений относится к группам I-III: I –  $Q \leq 15$  Бк/л, II –  $16 \leq Q \leq 99$  Бк/л, III –  $100 \leq Q \leq 184$  Бк/л. В Прибайкалье фон представляет группа I, а аномалии – группа II, тогда как в Забайкалье к фоновым относятся значения, соответствующие второй группе, а к аномальным – группы III и выше, что в последнем случае объясняется широким распространением магматических пород с повышенным содержанием урана.

3. В пределах Байкальского рифта и смежных территорий наличие аномалии, как правило, связано с приуроченностью подземных вод к разломной зоне. Радоновая активность обводненных разломов характеризуется пространственной неравномерностью. Во-первых, это выражается в повышении концентрации радиоактивного газа от крыльев к приосевой части дизъюнктива, причем радоновая аномалия часто смещена в сторону висячего блока. Во-вторых, неоднородность радонового поля проявляется в чередовании участков повышенных и пониженных концентраций вдоль оси разломной зоны, что связано с неравномерной плотностью разрывов оперения.

4. Водопроявления, относящиеся по концентрации растворенного радона к первой и второй группам, доминируют на территории Байкальского рифта и, таким образом, являются базовыми для организации и проведения мониторинговых исследований. Источники, относящиеся к третьей группе также пригодны для подобных работ, однако в пределах рассматриваемого региона встречаются сравнительно редко.

5. Опорная сеть опробования на радон создана в пределах урбанизированной территории Южного Приангарья в 2012 году и состоит из 8 приуроченных к разломам водопроявлений. По данным шестилетнего мониторинга эти воды относятся к нерадоновым, т.к. для них  $Q < 185$  Бк/л. По физико-химическим параметрам исследуемые водопроявления являются холодным и рН-нейтральным с разной степенью жесткости. Изучаемые характеристики непостоянны в пространстве и времени. Колебание концентрации растворенного газа составляет 30–60% от средней величины в опробуемом источнике. Показатели разности физико-химических характеристик составили от 10% для рН до 87.82 % для дебита источника.

6. Объемная активность растворенного радона в источниках подземных вод, приуроченных к разломным зонам Байкальского рифта, зависит от времени года. Главными факторами, оказывающими влияние на флуктуации радиоактивности подземных вод, являются атмосферное давление, температура воздуха, условия питания и формирования, а так же защищенность подземных вод от растворения атмосферными осадками. Как следствие, имеет место повышение концентраций в меженные периоды и понижение – в паводковые.

7. Разработана и применена модель прогнозирования концентрации растворенного радона в источниках подземных вод Южного Приангарья. Количественный анализ результатов прогнозирования показал, что сходимость с действительными замерами, в среднем, составила 80%.

Практическая значимость исследования заключается в проведении комплексного опробования водопроявлений на территории Байкальского региона с деферентом на нерадоновые воды. Анализ созданной базы данных дает возможность выделять геодинамически или геохимически активные разломные зоны, предложить связанные с содержанием радона рекомендации по водоподготовке источников питьевого водоснабжения, а также наметить перспективные водопроявления для организации бальнеологических объектов (подобных курорту «Нилова Пустынь» в Тункинской долине). Последнее особенно актуально для туристско-рекреационного потенциала юго-западного побережья оз. Байкал, в частности, для г. Байкальск, где недавно было закрыто градообразующее предприятие – целлюлозно-бумажный комбинат. Отдельно следует отметить значимость проведенных работ, как основы для выделения эманационных предвестников сильных землетрясений, что представляет особую важность для Прибайкалья, характеризующегося высокой сейсмической активностью.

## ПУБЛИКАЦИИ ПО ТЕМЕ ДИССЕРТАЦИИ

*Статьи в изданиях, включенных в «Перечень...» ВАК Минобрнауки России*

- 1) Семинский К.Ж., Бобров А.А., Дэмбэрэл С., Бурзунова Ю.П., Мунгунсүрен Д., Оюун-Эрдэнэ М., **Семинский А.К.**, Билгуун М., Тарасова А.А. Зона Хустайского разлома (Центральная Монголия): результаты эманационной съемки // Известия Сибирского отделения Секции наук о Земле РАЕН. Геология, поиски и разведка рудных месторождений. – 2014. – № 6 (49). – С. 68–81.
- 2) Семинский К.Ж., Рассказов С.В., **Семинский А.К.**, Михеева Е.А. Радон в нерадоновых подземных водах Байкальского региона: пространственно-временные вариации // Доклады РАН. – 2014. – Т. 457, № 5. – С. 573–578.
- 3) Черемных А.В., Бобров А.А., Черемных А.С., Зарипов Р.М., **Семинский А.К.** Джида-Удинский разлом (Байкальский регион): специфика внутренней структуры // Известия ИГУ. Серия «Науки о Земле». – 2014. – Т. 8. – С. 145–158.
- 4) Рассказов С.В., Чебыкин Е.П., Ильясова А.М., Воднева Е.Н., Чувашова И.С., Борняков С.А., **Семинский А.К.**, Снопков С.В., Чечельницкий В.В., Гилева Н.А. Разработка Култукского сейсмопрогностического полигона: вариации ( $^{234}\text{U}/^{238}\text{U}$ ) и  $^{87}\text{Sr}/^{86}\text{Sr}$  в подземных водах из активных разломов западного побережья Байкала // Геодинамика и тектонофизика. – 2015. – Т. 6. – № 4. – С. 519–553.
- 5) 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.
- 6) **Семинский А.К.** Радон в подземных водах Южного Прибайкалья: результаты мониторинга и прогноз концентраций // Известия Сибирского отделения Секции наук о Земле РАЕН. Геология, разведка и разработка месторождений полезных ископаемых. – 2017. – Т. 40. – № 4. – С. 57–68.
- 7) **Семинский А.К.**, Семинский К.Ж. Мониторинг физико-химических параметров подземных вод Южного Приангарья при проведении радиометрических исследований // Вопросы естествознания. – 2018. – № 3 (17). – С. 120–127.
- 8) **Семинский А.К.**, Семинский К.Ж. Мониторинг радона и физико-химических характеристик подземных вод Южного Прибайкалья // Известия Иркутского государственного университета. Серия «Науки о Земле». – 2018. – Т. 26. – С. 84–98.

*Материалы и тезисы докладов научных конференций*

- 1) Рассказов С.В., Чебыкин Е.П., Воднева Е.Н., Ильясова А.М., Михеева Е.А., Чувашова И.С., Борняков С.А., **Семинский А.К.**, Дэмбэрэл С. Перспективы мониторинга урана и  $^{234}\text{U}/^{238}\text{U}$  в водах активных разломов центральной части Байкальской рифтовой зоны и сопредельной территории Монголии // Физические основы прогнозирования разрушения горных пород: Тезисы докладов IX Международной школы-семинара (г. Иркутск, 2-6 сентября 2013 г.). – Иркутск: ИЗК СО РАН, 2013. – С. 71.
- 2) Рассказов С.В., Чебыкин Е.П., Ильясова А.М., Воднева Е.Н., Чувашова И.С., Борняков С.А., Фелелов Н.Н., **Семинский А.К.**, Снопков С.В., Чечельницкий В.В., Гилева Н.А. Создание Култукского сейсмопрогностического полигона: вариации ( $^{234}\text{U}/^{238}\text{U}$ ) и  $^{87}\text{Sr}/^{86}\text{Sr}$  в подземных водах из активных разломов западного побережья Байкала // Разломообразование в литосфере и сопутствующие процессы: тектонофизический анализ: Тезисы докладов Всероссийского совещания с участием приглашенных исследователей из других стран (11-16 августа 2014 г., г. Иркутск). – Иркутск: ИЗК СО РАН, 2014. – С. 160.
- 3) **Семинский А.К.** Систематизация источников подземных вод Прибайкалья и Забайкалья по содержанию радона: предварительные результаты // Строение литосферы и геодинамика: Материалы XXVI Всероссийской молодежной конференции (г. Иркутск, 20-25 апреля 2015 г.) – Иркутск: Институт земной коры СО РАН, 2015. – С. 164-166.
- 4) **Семинский А.К.**, Тугарина М.А. Временные изменения концентрации радона в подземных водах Иркутского района // Материалы Всероссийской научно-технической конференции Института Недропользования ИргТУ «Геонауки-2014: актуальные проблемы изучения недр» (г.Иркутск, 21-25 апреля 2014 г.). – Иркутск, ИргТУ, 2014. – С. 89-93.

5) **Семинский А.К.**, Тугарина М.А. Особенности распределения радона в подземных водах Байкальского региона // Геология, поиски и разведка полезных ископаемых и методы геологических исследований: Материалы Всеросс. научно-технической конференции с межд. участием «ГЕОНАУКИ-2013»: актуальные проблемы изучения недр. – Иркутск: ИрГТУ, 2013. – С. 133-137.

6) Семинский К.Ж., Бобров А.А., Дэмбэрэл С., Бурзунова Ю.П., Мунгунсурен Д., Оюун-Эрдэнэ М., **Семинский А.К.**, Билгуун М., Тарасова А.А. Радоновая активность Хустайского разлома в центральной Монголии: предварительные результаты // Современная геодинамика и опасные процессы в Центральной Азии: Труды X Российско-Монгольской конференции по проблемам астрономии и геофизики «Солнечно-Земная физика и сейсмогеодинамика Байкало-Монгольского региона» (г. Улан-Батор, Монголия, 29 сентября – 3 октября 2014 г.). – Вып. 8. – Иркутск: ИЗК СО РАН, ИСЗФ СО РАН, 2015. – С.116-127.

7) Чебыкин Е.П., Рассказов С.В., Воднева Е.Н., Ильясова А.М., Михеева Е.А., Чувашова И.С., Борняков С.А., **Семинский А.К.**, Снопков С.В. Мониторинг U и  $^{234}\text{U}/^{238}\text{U}$  в водах активных разломов на западном замыкании Южно-Байкальской впадины Байкальской рифтовой зоны: первые результаты // Континентальный рифтогенез, сопутствующие процессы: Материалы Всероссийского симпозиума с международным участием (г. Иркутск, 20-23 августа 2013 г.). – В 2-х т. – Иркутск: ИЗК СО РАН, 2013. – Т. 2. – С. 168-173.

8) Черемных А.В., Бобров А.А., Черемных А.С., Зарипов Р.М., **Семинский А.К.** Джидино-Удинская разломная зона (Байкальский регион): внутренняя структура и газовые эманации // Тектоника, глубинное строение и минерализация Востока Азии: Материалы VIII Косыгинских чтений (г. Хабаровск, 17-20 сентября 2013 г.). – Владивосток: Дальнаука, 2013. – С. 206-209.

9) Рассказов С.В., Чебыкин Е.П., Ильясова А.М., Чувашова И.С., Воднева Е.Н., **Семинский А.К.** Идентификация деформационного эффекта по отношениям активностей  $^{234}\text{U}/^{238}\text{U}$  в подземных водах на профиле Иркутск–Байкал // Геолого-геофизическая среда и разнообразные проявления сейсмичности: Материалы Международной конференции (г. Нерюнгри, 23-25 сентября 2015 г.) – Нерюнгри: Изд-во Технического института (ф) СВФУ, 2015. – 2015. – С. 22-29.

10) **Семинский А.К.** Объемная активность радона в подземных водах Южного Приангарья: результаты мониторинга // Проблемы геологии и освоения недр: Материалы XX Международного симпозиума имени академика М.А. Усова студентов и молодых ученых (г. Томск, 4-9 апреля 2016 г.) – 2016. – С. 590-592.

11) **Семинский А.К.** Результаты статистической обработки данных мониторинга объемной активности радона в источниках подземных вод (на примере Южного Приангарья) // Современная геодинамика центральной Азии и опасные природные процессы: результаты исследований на количественной основе: Материалы III Всероссийского совещания и II Всероссийской молодежной школы по современной геодинамике (г. Иркутск, 19-23 сентября 2016 г.) – Иркутск: Институт земной коры СО РАН, 2016. – С. 109-111.

12) **Семинский А.К.**, Семинский К.Ж. Мониторинг радоновой активности в источниках подземных вод зоны влияния крупного Ангарского разлома (на отрезке Листвянка – Иркутск): анализ первых результатов // Тектонофизика и актуальные вопросы наук о Земле: Материалы IV тектонофизической конференции в ИФЗ РАН (г. Москва, 3-8 октября 2016 г.) – 2016. – С. 543-547.

13) **Семинский А.К.** Главные факторы формирования эманационного поля Забайкалья: результаты радонометрического исследования подземных вод // Материалы V Международной конференции молодых ученых и специалистов памяти академика А.П.Карпинского (г. Санкт-Петербург 23 февраля - 3 марта 2017 г.) – Санкт-Петербург, ВСЕГЕИ, – 2017. – С. 641-643.

14) Семинский К.Ж., **Семинский А.К.** Радон в обводненных разломных зонах Байкальского региона: уровни содержания и их вариации в пространстве и времени // Триггерные эффекты в геосистемах: тезисы докладов IV Всероссийской конференции с международным участием (Москва, 6-9 июня, 2017 г.) – М.: ГЕОС, –2017. – С. 88.

15) **Семинский А.К.** Прогноз концентрации растворенного радона в источниках подземных вод (на примере Южного Приангарья) // Строение литосферы и геодинамика: Материалы XXVII Всероссийской молодежной конференции с участием исследователей из других стран (г.Иркутск, 22-28 мая 2017 г.). – Иркутск: Институт земной коры СО РАН, 2017. – С. 294.

16) **Семинский А.К.**, Семинский К.Ж. Мониторинг радона в подземных водах Южного Прибайкалья (результаты статистического анализа) // Всероссийское совещание по подземным водам востока России: Материалы XXII Всероссийского совещания по подземным водам Сибири и Дальнего (г. Новосибирск, 18-24 июня 2018 г.) Новосибирск: ИПЦ НГУ.– 2018.– С. 434-439.

Подписано в печать 22.01.2019 г. Формат 60х84 1/16  
Бумага офсетная. Печать Riso.  
Усл. печ. л. 1,4. Уч.-изд. л. 1,3. Тираж 120 экз. Заказ 99.  
Отпечатано в Институте земной коры СО РАН  
664033, Иркутск, ул. Лермонтова, 128