



УДК 556.06+556.043 (1-925.16)

DOI <https://doi.org/10.26516/2073-3402.2018.26.84>

Мониторинг радона и физико-химических характеристик подземных вод Южного Прибайкалья

А. К. Семинский

Институт земной коры СО РАН, г. Иркутск

К. Ж. Семинский

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

Аннотация. Цель исследования – изучение общих закономерностей эманаций растворенного радона в зависимости от физико-химических характеристик подземных вод Южного Прибайкалья. Рекогносцировочное опробование позволило выбрать восемь пунктов режимных наблюдений, по которым дважды в месяц определялись физико-химические параметры воды (включая концентрацию радона), а также оценивались показатели метеоусловий и сейсмической активности в регионе. Анализ полученной базы данных послужил основанием для следующих выводов. По радиоактивности исследованные водопроявления делятся на три группы (1-я со средней концентрацией радона ≈ 15 Бк/л, 2-я ≈ 30 Бк/л и 3-я ≈ 60 Бк/л), что определяется условиями питания и формирования подземных вод. Изменения концентрации растворенного радона за период мониторинга составляют 30–60 % от средней величины данного параметра в опробуемом источнике. Также подземные воды классифицируются как холодные и нейтральные с разной степенью жесткости. Абсолютные пределы изменений изученных параметров характеризуются следующими величинами: температура воды составляет 1,7–12 °С, $\Delta \approx 42,88$ % от средней температуры воды в источнике; водородный показатель – 7–9,9, $\Delta \approx 10$ % от средней величины; электропроводимость раствора – 43–412 $\mu\text{S}/\text{cm}$, $\Delta \approx 18,52$ % от средней величины; жесткость воды – 85–833 Ppm , $\Delta \approx 14,08$ % от средней величины; дебит – 0–140 л/мин, $\Delta \approx 87,82$ % от средней величины. Изученные параметры разделены на три группы. Первую представляют величины, достигающие своих максимальных значений в меженный период (количество растворенного радона, водородный показатель и атмосферное давление). Вторую составляют параметры, проявляющие максимумы в паводковые периоды (температура воды и дебит водоисточников, температура и влажность воздуха). Параметры из третьей группы не имеют зависимости от времени года (жесткость и проводимость воды, а также показатель сейсмической активности).

Ключевые слова: подземные воды, мониторинг, радон, физико-химические характеристики, Южное Прибайкалье.

Для цитирования: 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. <https://doi.org/10.26516/2073-3402.2018.26.84>

Введение

Изучение вариаций радиоактивности подземных вод во времени представляет существенный интерес для многих аспектов жизнедеятельности человека. В частности, изменения эманационного поля могут быть использованы как маркеры тектонических процессов, происходящих при подготовке сильных землетрясений. Вместе с тем колебания концентрации радиоактивного газа (Q) могут свидетельствовать как об активных перемещениях по разломам или изменении напряженного состояния земной коры, так и о сезонной смене режима питания подземных вод или локальном изменении температуры окружающей среды [Determination of radon ... , 2013].

С целью изучения особенностей временных вариаций параметра Q , а также факторов, определяющих эти вариации, во многих регионах мира проводятся мониторинговые исследования [Султанхаджаев, Хитаров, 1978, Toutain, Vaubron, 1999, Tsunomori, Kuo, 2010, p. 139, Woith, 2015, p. 611, Geographically weighted regression ... , 2017, p. 341, 355, 382, 403, 412]. Регулярные измерения радоновой активности, как правило, дополняются метеопараметрами, характеристиками сейсмической активности изучаемых территорий, а также физико-химическими характеристиками подземных вод. Несмотря на значительное количество публикаций, посвященных анализу данных мониторинга, выявление общих закономерностей периодических флуктуаций радонового поля и их обусловленности конкретными факторами представляет достаточно сложную и актуальную задачу. Прежде всего это связано со спецификой природных условий, свойственных полигонам и определяющихся разнообразием геологического строения, сейсмического режима, характера метеорологических процессов. Таким образом, существует острая необходимость в организации мониторинговых исследований в регионах с разнотипными условиями формирования эманационного поля.

Работы по изучению временных флуктуаций концентрации растворенного радона особенно актуальны для урбанизированных районов Южного Прибайкалья, часть которых располагается в пределах Байкальской рифтовой зоны, характеризующейся сложным тектоническим строением, интенсивной сейсмичностью и относящейся к радоноопасным территориям [Максимовский, Решетов, Харламов, 1995]. В настоящий момент информация о радиоактивности подземных вод в пределах рассматриваемой территории имеет достаточно общий характер.

В некоторых публикациях [Власов, Ткачук, Толстихин, 1962, Куликов, Желваков, Бондаренко, 1991] представлены данные о пространственном расположении источников подземных вод и количественном содержании в них растворенного радона. Основное внимание в этих работах уделено водопрооявлениям, относящимся по концентрации радиоактивного газа к собственно радоновым ($Q \geq 185$ Бк/л). Режимные наблюдения на территории Байкальского региона имеют прикладную направленность, так как проводятся в ходе эксплуатации источников с повышенными концентрациями радона для контроля качества воды, которая используется в лечебных целях. Как следствие, результаты анализа длинных рядов мониторинга пара-

метра Q на территории Байкальского региона практически не представлены в научной литературе.

Целью настоящего исследования было изучение общих закономерностей эманацій радона в совокупности с флуктуациями физико-химических характеристик подземных вод Южного Прибайкалья.

В проведенном исследовании выделяются предварительный и основной этапы. Предварительный этап включал в себя выбор на территории Южного Прибайкалья опорной сети источников подземных вод, наиболее подходящих для организации эманационных мониторинговых работ, разработку методической основы режимных наблюдений, а также получение длинных рядов измерений объемной активности радона и серии перечисленных ниже параметров окружающей среды. Основным этапом заключался в проведении всестороннего анализа данных мониторинга и установлении наиболее общих закономерностей вариаций изучаемых количественных характеристик во времени, сопоставлении рядов измерений объемной активности радона с вариациями таких параметров, как энергетический класс землетрясений (происходящих в дни отбора проб), температура и влажность окружающего воздуха, атмосферное давление, и некоторых физико-химических характеристик подземных вод (температура воды, водородный показатель (рН), электрическая проводимость (ЕС) и жесткость (TDS)), а также в выявлении главных факторов формирования эманационного поля.

Материалы и методы исследования

Измерение концентрации радиоактивного газа в воде (Q , Бк/л) осуществлялось с помощью радиометра РРА-01М-03 с пределом погрешности $\approx 30\%$. Для определения физико-химических параметров воды использовался экспресс-анализатор Hanna HI 98129 Combo. Посредством экспресс-анализатора определялись: рН, ЕС, TDS и температура воды. Замеры дебита источников осуществлялись объемным методом. К анализу также привлекалась информация о метеоусловиях (температуре, давлении, влажности) и энергетическом классе сейсмических событий, произошедших в Прибайкалье за время отбора проб [Архив погоды в Иркутске; Основной каталог событий].

Для каждого пункта режимных наблюдений формировался массив данных, включающий: 1) дату отбора пробы; 2) концентрацию растворенного радона; 3) температуру воды; 4) водородный показатель; 5) показатель электропроводности; 6) показатель жесткости воды; 7) дебит источника; 8) температуру воздуха; 9) атмосферное давление; 10) атмосферную влажность; 11) коэффициенты сейсмических событий, произошедших в исследуемом регионе.

Обсуждение результатов

В рамках предварительного этапа работ было проведено рекогносцировочное опробование более 50 источников подземных вод, располагающихся на территории Южного Прибайкалья (рис. 1). Согласно результатам предыдущих исследований [Семинский, Тугарина, 2013, Семинский, Семинский,

2016], в качестве объектов мониторинга лучше всего подходят источники, для которых параметр Q изменяется в следующих пределах: $16 \leq Q \leq 99$ Бк/л. Такие водопроявления на территории Южного Прибайкалья являются аномальными по содержанию радиоактивного газа, вариативность концентрации которого дает возможность отчетливо наблюдать сезонную изменчивость и аномальные всплески. Кроме уровня радоновой активности, важным критерием является наличие незастойного режима водообмена с малым доступом кислорода к зеркалу водной поверхности. Круглогодичное функционирование выбранных согласно перечисленным критериями водопунктов является обязательным условием, поскольку, с одной стороны, обеспечивает связь таких источников с подземными водами, а с другой – позволяет получить длинные ряды данных без перерыва в межлетний период. Кроме того, для режимных наблюдений были необходимы водопроявления, приуроченные к бортам долин разломного происхождения, что позволяет проследить, изменяется ли концентрация газа в воде в периоды тектонической активности.

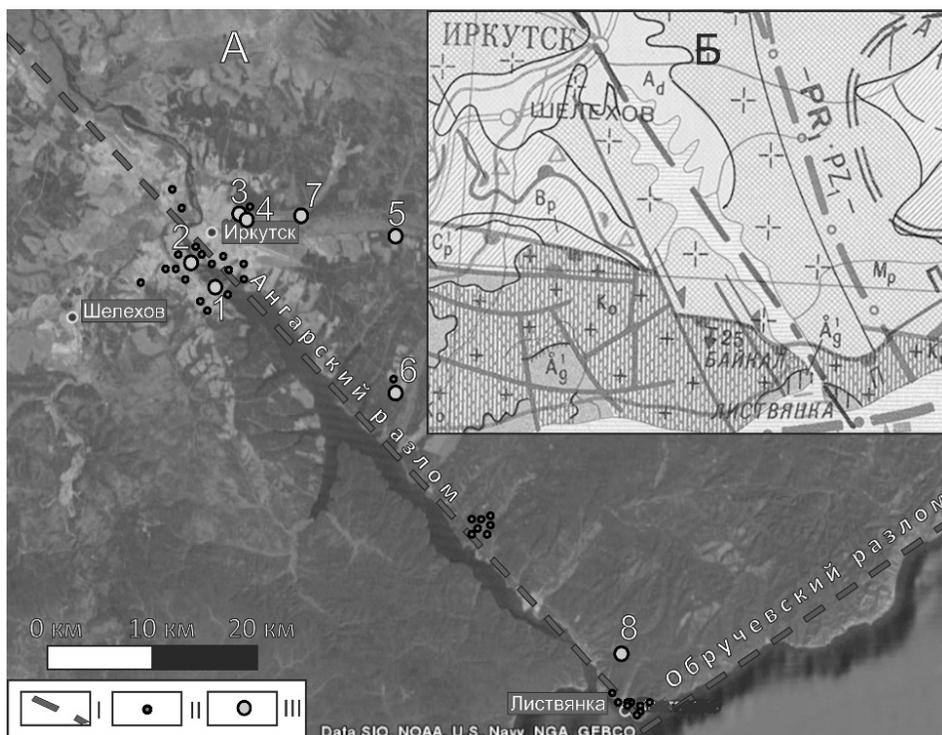


Рис. 1. Карта расположения опробованных водопроявлений на территории Южного Прибайкалья: А – космоснимок территории исследования; Б – фрагмент карты разломов юга Восточной Сибири (по [Карта разломов юга ... , 1982] с упрощениями)

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

В соответствии с перечисленными критериями была создана сеть регулярных опробований из восьми источников. Территория расположения этих водопроявлений включает г. Иркутск, несколько поселков и окружающие селитебные земли на правом берегу Иркутского водохранилища (см. рис. 1, А). Район принадлежит к зоне влияния крупного Ангарского разлома (см. рис. 1, Б), связанного с сетью разрывов Байкальского рифта.

Для разработки методической основы мониторингового исследования было проведено ежедневное опробование одного источника подземных вод (входящего в сеть регулярных измерений) в течение месяца. Данный вид работ был организован в пункте мониторинга СЗ (Южная). Исследование проводилось с конца октября по конец ноября с целью зафиксировать частоту и амплитуду флуктуаций физико-химических параметров при наступлении зимнего межлетнего периода. Отбор пробы производился один раз в сутки в одно и то же время.

Анализ полученных ежедневно в течение месяца непрерывных рядов данных показал, что практически все параметры испытывают вариации во времени. Так, объемная активность радона, растворенного в воде, за месяц возросла на 32 % ($\Delta = 8$ Бк/л) относительно уровня, зафиксированного в первый день опробования. Температура воды опробуемого источника понизилась на 3 % ($\Delta = 0,2$ °С). Водородный показатель изменился на 2 % ($\Delta = 0,19$ рН) в сторону щелочной среды. Показатели проводимости (ЕС) и жесткости (TDS) не проявили значительных изменений за месяц; их колебания составили 0,85 ($\Delta = 5$ $\mu\text{S}/\text{cm}$) и 0,7 % ($\Delta = 2$ Ppm) соответственно. Дебит источника снизился на 35 % ($\Delta = 12$ л/мин), что свидетельствует о сезонной смене режима его функционирования. Изменения всех фиксируемых величин происходили постепенно, с незначительными колебаниями.

В связи с тем что основной интерес представляет информация об изменениях концентрации растворенного радона во времени, было принято решение организовать мониторинговые исследования таким образом, чтобы обеспечить возможность фиксирования всех значимых колебаний этого параметра. Под значимыми в данном случае понимаются изменения, которые превышают предел погрешности метода или прибора, используемых для измерения параметра Q . Предел максимального отклонения результатов замеров радиометра РРА-01М-03 от действительных значений составляет ± 30 %. Следовательно, изменение параметра Q , зафиксированное за месячный период ежедневного опробования, следует считать значимым. Согласно правилам математической статистики для выявления волны гармонического колебания, оцениваемой по оси ординат, необходим масштаб оси абсцисс, равный половине длины этой волны. Соответственно, если период зафиксированного значимого колебания равен одному месяцу, следует производить измерения один раз в две недели.

Еще одной причиной выбора частоты опробования является то, что в специальной литературе [Determination of radon ... , 2014] встречается значительное количество информации о наличии гармонических колебаний параметра Q с периодом от 3 ч до 14 сут, но ясности в причинах появления

этих флуктуаций нет. Более того, у разных авторов они отличаются даже для колебаний с одинаковым периодом. Частота измерений один раз в две недели позволяет на данном этапе исследований ограничиться анализом наиболее значимых и отчетливо проявляющихся вариаций параметра Q , а также существенно снизить время и трудозатраты процесса опробования.

По результатам предварительного этапа исследования были организованы режимные наблюдения в опорной сети источников подземных вод, которые позволили сформировать базу данных, включающую информацию о содержании растворенного радиоактивного газа, а также серии физико-химических характеристик воды и разнородных параметров окружающей среды. Весь объем анализируемых данных можно разделить на две основные группы. Первую представляют оригинальные материалы, полученные путем анализа проб воды, а также результаты гидрометрических измерений, сделанных в пунктах мониторинга. Вторая часть содержит серии параметров окружающей среды, заимствованных из баз данных, находящихся в свободном доступе [Архив погоды в г. Иркутске; Основной каталог событий].

Основной этап работ включал в себя анализ средних значений и временных вариаций физико-химических параметров подземных вод (в том числе и Q) на качественном уровне. В целом подземные воды исследуемого района, согласно используемой в России градации по параметру Q [Куликов, Желваков, Бондаренко, 1991], являются нерадоновыми ($Q \leq 185$ Бк/л). Уровень фона для показателей радоновой активности в исследуемых водопунктах составил примерно 4 Бк/л, однако в источниках, вошедших в сеть регулярных опробований, концентрация этого газа превышает фоновые значения в десятки раз.

Замеры характеристик физического состояния исследуемых вод позволили, согласно существующим классификациям, отнести их к холодным ($T(\text{ист.}) < 20$ °С) и нейтральным ($7 < \text{pH} < 11$ (предел измерений экспресс-рН-метра – от 1 до 14)). Показатель жесткости в рамках мониторинговой сети меняется в широких пределах. Вода в источнике «Колхозная» по данному показателю относится к «очень жесткой» ($^{\circ}\text{Ж} \approx 8$), тогда как вода из пункта мониторинга «Худяково» является «мягкой» ($^{\circ}\text{Ж} \approx 0,9$). Вода остальных пунктов мониторинга определяется в соответствии с используемой классификацией как «жестковатая». В связи с тем что показатели жесткости и проводимости обусловлены концентрацией солей в опробуемом растворе, подобные в качественном отношении различия имеют место и для показателя электропроводимости подземных вод.

Анализ рядов мониторинговых измерений, полученных в течение шести последних лет, показал, что содержание радона в воде колеблется, причем ΔQ составляет 30–60 % от средней величины данного параметра в опробуемом источнике (рис. 2).

Такой вывод коррелирует с результатами мониторинговых измерений в различных регионах мира, где отмечено, что величина данного параметра в одном водоисточнике может меняться в несколько раз [Toutain, Vaubron, 1999; Woith, 2015]. Абсолютным минимальным значением Q в пределах

изучаемой территории стало полное отсутствие растворенного газа в воде. Абсолютный максимальный уровень объемной активности радона – 110,5 Бк/л – был зафиксирован в источнике «Никола», находящемся в 50 км юго-восточнее г. Иркутска, тогда как минимальная величина Q для данного источника составила 24 Бк/л.

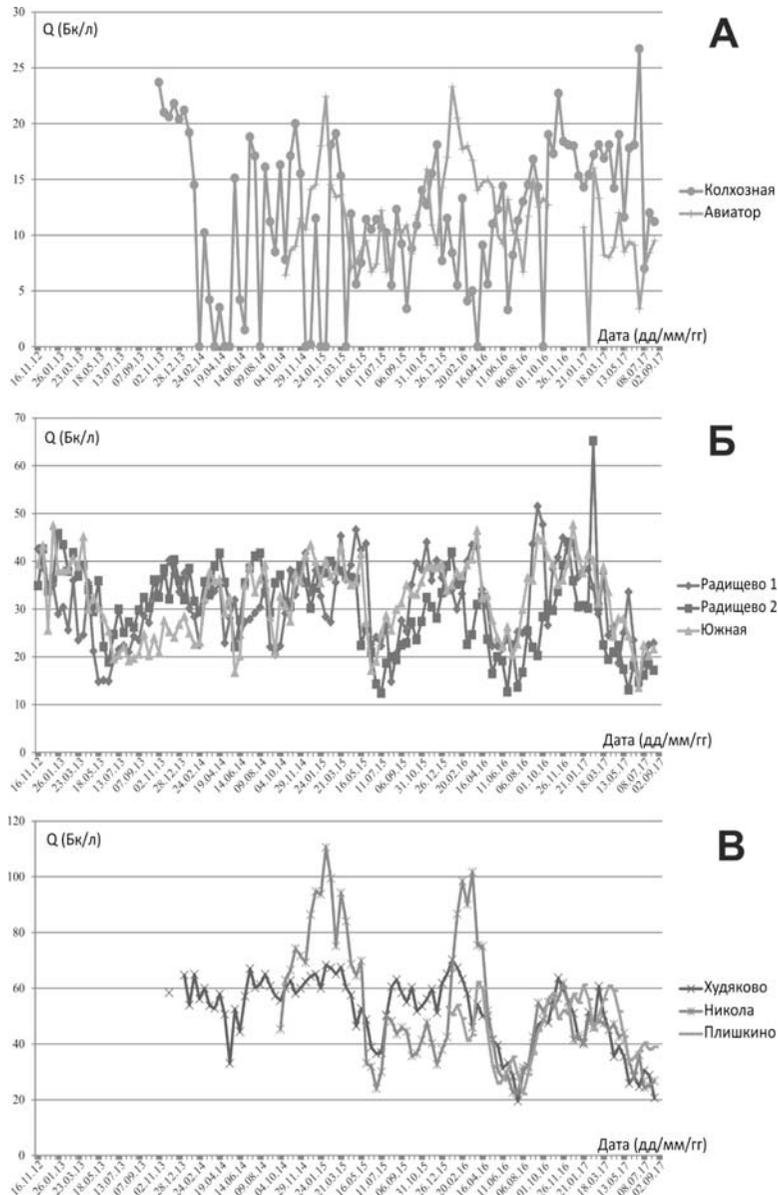


Рис. 2. Мониторинговые ряды измерений параметра Q , полученные в течение шести лет: А – группа водопроводов с $Q_{\text{ср}} \approx 15$ Бк/л; Б – группа водопроводов с $Q_{\text{ср}} \approx 30$ Бк/л; В – группа водопроводов с $Q_{\text{ср}} \approx 60$ Бк/л

По среднему содержанию радона в воде за период опробования изучаемые водопрооявления целесообразно разделить на три группы: 1-я – $Q_{\text{ср}} \approx 15$ Бк/л, 2-я – $Q_{\text{ср}} \approx 30$ Бк/л и 3-я – $Q_{\text{ср}} \approx 60$ Бк/л (см. рис. 2). Кроме абсолютных значений параметра Q , графики его вариаций во времени, построенные для источников из разных групп, характеризуются некоторыми отличиями, что может быть связано с различием в условиях формирования подземных вод. Водопрооявления из первой группы, по-видимому, получают воду из поверхностного стока и практически не имеют связи с глубинными водами (см. рис. 2, А): для них характерно хаотичное изменение значений Q , причем в некоторые периоды времени радон в этих источниках не фиксируется. Вторая группа питается за счет подземных вод, приуроченных к разломам, и перекрыта от разбавления атмосферными осадками (см. рис. 2, Б): изменение параметра Q происходит постепенно, практически отсутствуют аномальные всплески и уровень радоновой активности всегда выше атмосферного фона. Источники, принадлежащие к третьей группе, находятся в непосредственной близости от наиболее активных разрывных нарушений (см. рис. 2, В): в них также происходит постепенное изменение концентрации радона, но иногда фиксируются аномальные всплески содержания радиоактивного газа, что, вероятно, связано с тектонической активностью разломов, к которым приурочены данные водопункты.

Материалы шестилетних измерений позволили для периода в 1 год рассчитать среднюю концентрацию радона за месяц по каждому из исследуемых источников. Графики изменчивости параметра Q , соответствующие разным годам для отдельно взятого источника, в первом приближении подобны. В то же время графики водопрооявлений, относящихся по среднегодовой концентрации радона к разным группам, имеют отличия и в характере вариативности. Так, источникам из первой группы ($Q_{\text{ср}} \approx 15$ Бк/л) соответствуют пологие графики, общая линия тренда просматривается слабо, а $\Delta Q \approx 10$ Бк/л. Водопрооявления из второй группы ($Q_{\text{ср}} \approx 30$ Бк/л) характеризуются выраженными колебаниями во времени, четко наблюдаемой общей линией тренда, $\Delta Q \approx 20$ Бк/л. Третья группа источников ($Q_{\text{ср}} \approx 60$ Бк/л) имеет резко выраженные годовые изменения, общая линия тренда наблюдается, однако присутствуют внутригрупповые особенности, $\Delta Q \approx 40$ Бк/л (рис. 3). Наличие и характер отличительных признаков, а также совпадение количественных оценок с результатами анализа графиков мониторинга подтверждают объективность разделения источников на группы.

Анализ физических показателей подземных вод позволил установить, что практически все они характеризуются наличием значимых вариаций в пространстве и времени. Так, температура воды за период мониторинговых наблюдений (2012–2017 гг.) в различных пунктах опробования находилась в пределах от 1,7 до 12 °С, т. е. $\Delta T(\text{ист.}) \approx 42,88$ % от средней величины данной характеристики в опробуемом источнике. Водородный показатель на изучаемой территории за тот же временной отрезок находился в пределах от 7 до 9,9, $\Delta \text{pH} \approx 10$ % от $\text{pH}_{\text{ср}}(\text{ист.})$. Показатель проводимости колебался от 43 до 412 $\mu\text{S}/\text{см}$, $\Delta \text{ЕС} \approx 18,52$ % от $\text{ЕС}_{\text{ср}}(\text{ист.})$. Жесткость соответствовала

уровням от 85 до 833 Ppm, $\Delta TDS \approx 14,08\%$ от TDS_{cp} (ист.). Дебит также отличался пространственно-временными флуктуациями и изменялся от полного отсутствия потока (в котором возможно оценить этот параметр количественно) до 140 л/мин, $\Delta D \approx 87,82\%$ от D_{cp} (ист.).

Пространственная группировка опробуемых водопроявлений по каким-либо из физико-химических параметров затруднена по причине отсутствия значительных внутригрупповых особенностей, а также в силу активного антропогенного воздействия, вызвавшего деградацию водоносных горизонтов, питающих опробуемые источники, вследствие вырубки леса, строительства дорог и путепроводов.

Среди изученных величин близкие значения разности (Δ) во времени оказались характерны для водородного показателя, а также количественных параметров проводимости и жесткости. Это обусловлено тем, что концентрация ионов водорода, определяющих рН воды, в совокупности с концентрацией растворенных минеральных солей (показателем жесткости) в большей степени определяют электропроводимость воды. Наибольшие флуктуации были зафиксированы для температуры подземных вод, а также дебитов источников. Такая закономерность, вероятнее всего, связана с климатическими особенностями исследуемого региона. Резко континентальный климат характеризуется значительными сезонными колебаниями атмосферной температуры, которые, в свою очередь, оказывают влияние на температурный режим подземных вод. Кроме того, в регионах, находящихся в пределах поясов резко континентального климата с приблизительно нулевой среднегодовой температурой, в зимние месяцы отсутствует питание подземных вод атмосферными осадками, что оказывает непосредственное влияние на дебит источников.

Наиболее общие закономерности флуктуаций параметра Q в течение года могут быть проиллюстрированы на примере рис. 3. Максимальный показатель 70,2 Бк/л в источнике со среднегодовым значением 51,17 Бк/л был зафиксирован в феврале. Этот месяц относится к зимней межени, когда свободный выход газа на поверхность затруднен из-за сезонного промерзания верхней части разреза. Вследствие этого газ накапливается в приповерхностном слое и выходит только вместе с водой из родников. Минимальное значение $Q \approx 22$ Бк/л для рассматриваемого источника было зафиксировано в августе. Этот месяц относится к паводковому периоду, когда газ может беспрепятственно выходить на поверхность через почвенный слой и, следовательно, в меньшей степени концентрироваться в подземных водах. Помимо того, в этот период осуществляется питание подземных вод атмосферными осадками, которые благодаря отсутствию в них радона в целом снижают концентрацию газа.

Для сопоставления рядов измерений объемной активности радона с вариациями остальных параметров были построены и проанализированы графики изменения всех фиксируемых величин для каждого из источников сети регулярных опробований в отдельности. Графики, представленные в качестве примера (рис. 4), построенные для пункта опробования «Худяково»,

являются репрезентативными для изучаемых величин во всех пунктах мониторинга. Отдельно следует отметить, что величины изменчивости Δ у всех характеристик превышают погрешности методов измерений, т. е. зафиксированные колебания являются значимыми.

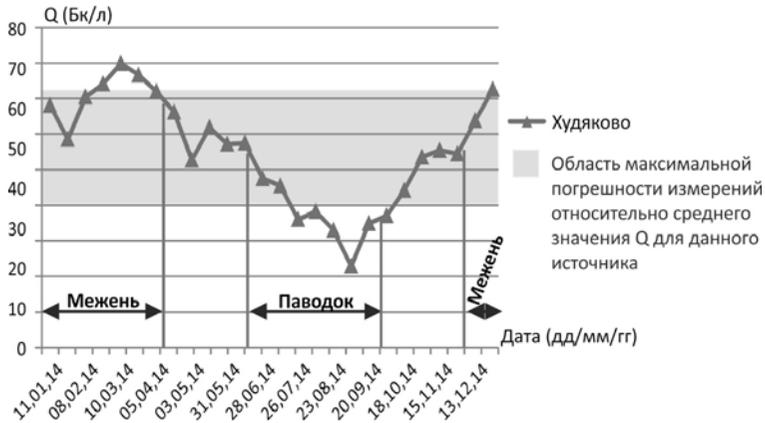


Рис. 3. График временных изменений концентрации радона в подземных водах источника, расположенного в предместье Радищево (г. Иркутск)

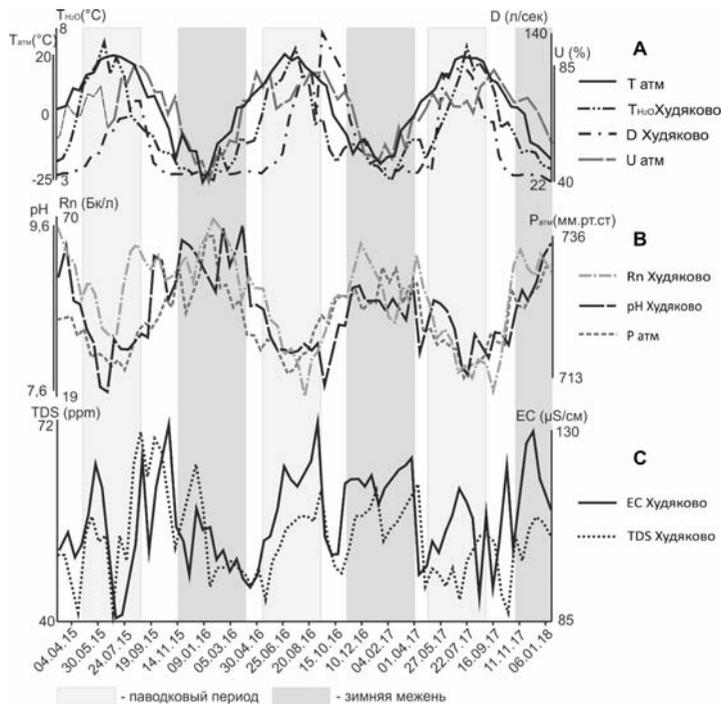


Рис. 4. Графики колебаний изучаемых параметров во времени для источника «Худяково»: А – группа параметров, достигающих максимальных значений в паводковые периоды; Б – группа параметров, достигающих максимальных значений в меженные периоды; В – группа параметров, не имеющая очевидной зависимости с периодом года

Анализ представленных графиков показал, что изучаемые параметры целесообразно разделить на три группы. К первой относятся величины, достигающие своих максимальных значений в теплые месяцы года, когда среднесуточная температура воздуха выше нуля (паводковые периоды). Минимальные значения данных характеристик фиксируются в холодные месяцы (период зимней межени). В эту группу входят показатели атмосферной температуры и влажности, а также температура воды и дебит водоисточников (см. рис. 4, *А*). Обратная картина наблюдается у параметров второй группы. Для них максимальные значения отмечаются в зимние месяцы, а минимальные – летом. Вторую группу составляют атмосферное давление, водородный показатель воды и количество растворенного радона (см. рис. 4, *Б*). Третью группу формируют характеристики жесткости и проводимости воды, а также показатель сейсмической активности в регионе. Отличительной особенностью данной группы параметров является то, что их флуктуации не имеют заметной связи с сезонами года. Вместе с тем графики колебаний во времени характеристик из третьей группы проявляют хорошую внутригрупповую сходимость (иногда с небольшим сдвигом колебаний во времени), что, вероятно, связано с единой природой параметров (см. рис. 4, *В*).

Выводы

Рекогносцировочное опробование нескольких десятков источников подземных вод, располагающихся в пределах Южного Прибайкалья, позволило выбрать серию водопунктов для организации режимных наблюдений, соответствующих современным требованиям эманационного мониторинга. Сеть опробования составили восемь водопроявлений в г. Иркутске и на правом берегу Иркутского водохранилища, для которых один раз в две недели определялись физико-химические параметры подземных вод (включая концентрацию радона – Q), а также показатели метеоусловий и сейсмической активности в регионе.

Анализ базы данных, включающей измерения комплекса параметров в течение шести лет (2012–2018 гг.), послужил основанием для следующих выводов.

1. По радиоактивности исследованные в Южном Прибайкалье водопроявления делятся на три группы (1-я – $Q_{\text{ср}} \approx 15$ Бк/л, 2-я – $Q_{\text{ср}} \approx 30$ Бк/л и 3-я – $Q_{\text{ср}} \approx 60$ Бк/л), что, по-видимому, определяется условиями питания и формирования подземных вод. Изменения величины Q за период мониторинга составляет 30–60 % от средней величины данного параметра в опробуемом источнике.

2. По физическим характеристикам подземные воды, изученные в режиме мониторинга, классифицируются в целом как холодные и нейтральные с жесткостью, варьирующей от «мягкой» до «очень жесткой» в разных водоисточниках.

3. Анализ графиков, полученных в процессе мониторинговых исследований, показал, что радиоактивность подземных вод, как и большинство изученных показателей, в существенной степени определяется климатиче-

скими условиями Южного Прибайкалья. В этом отношении проанализированные показатели делятся на три группы. К одной из них относятся величины, достигающие своих максимальных значений в холодные месяцы года (количество растворенного радона, водородный показатель воды и атмосферное давление). У параметров другой группы наблюдается обратная картина (температура воды и дебит водоисточников, температура и влажность воздуха). Особенностью параметров из третьей группы (жесткость и электропроводимость воды, а также показатель сейсмической активности) является то, что их флуктуации не демонстрируют заметной зависимости от периода года, но отличаются хорошей внутригрупповой сходимостью.

Работа выполнена в рамках интеграционной программы ИНЦ СО РАН «Фундаментальные исследования и прорывные технологии как основа опережающего развития Байкальского региона и его межрегиональных связей».

Список литературы

Карта разломов юга Восточной Сибири. Масштаб 1: 1 500 000 / В. К. Александров, А. В. Демин, Т. В. Мордовская, А. П. Таскин, П. М. Хренов, С. П. Лебедев ; под ред. П. М. Хренова ; М-во геологии СССР, ВОСТСИБНИИГТ и МС. Иркутск, 1982. 6 с.

Основной каталог событий [Электронный ресурс] // Байкальский филиал геофизической службы. URL: <http://seis-bykl.ru/> (дата обращения: 10.02.2016).

Власов Н. А., Ткачук В. Г., Толстихин Н. И. Минеральные воды Южной части Восточной Сибири. В 2 т. М. : Изд-во АН СССР, 1962. 2 т.

Куликов Г. В., Желваков А. В., Бондаренко С. С. Минеральные лечебные воды СССР : справочник. М. : Недра, 1991. 339 с.

Максимовский В. А., Решетов В. В., Харламов М. Г. Карта радоноопасности России. Масштаб 1:10 000 000 / под ред. А. А. Смыслова. М. : АПБ. СПбГГИ, 1995. 1 с.

Архив погоды в Иркутске [Электронный ресурс] // Расписание погоды. URL: <http://tr5.ru/> (дата обращения: 10.02.2016).

Семинский А. К., Тугарина М. А. Особенности распределения радона в подземных водах Байкальского региона // Геология, поиски и разведка полезных ископаемых и методы геологических исследований : «ГЕОНАУКИ-2013»: актуальные проблемы изучения недр : материалы Всерос. науч.-техн. конф. с междунар. участием. Иркутск, 2013. С. 133–137.

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.

Султанхаджаев А. Н., Хитаров Н. И. Гидрогеосейсмологические исследования в Восточной Фергане. Ташкент : Изд-во Ин-та сейсмологии, 1978. 189 с.

Geographically weighted regression and geostatistical techniques to construct the geogenic radon potential map of the Lazio region: A methodological proposal for the European Atlas of Natural Radiation / G. Ciotoli, M. Voltaggio, P. Tuccimei, M. Soligo, A. Pasculli, S. Beaubien, S. Bigi // Journal of Environmental Radioactivity. 2017. N 166. P. 355–375.

Residential, soil and water radon surveys in north-western part of Romania // A. Cucos, B. Papp, T. Dicu, M. Moldovan, B. Burghel, T. Moraru, A. Tenter, C. Cosma // Journal of Environmental Radioactivity. 2017. N 166. P. 412–416.

Determination of radon concentration levels in wellwater in Konya, Turkey / M. Erdogan, N. Eren, S. Demirel, V. Zedef // Radiat. Protect. Dosimetry. 2013. Vol. 156, N 4. P. 489–494.

Correlation analysis of the natural radionuclides in soil and indoor radon in Vojvodina, Province of Serbia / S. Forkapic, D. Maletic, J. Vasin, K. Bikit, D. Mrdja, I. Bikit, V. Udovicic, R. Banjanac // *Journal of Environmental Radioactivity*. 2017. N 166. P. 403–411.

Indoor radon, geogenic radon surrogates and geology – Investigations on their correlation / H. Friedmann, A. Baumgartner, M. Bernreiter, J. Graser, V. Gruber, F. Kabrt, H. Kaineder, F. Maringer, W. Ringer, C. Seidel, G. Wurm // *Journal of Environmental Radioactivity*. 2017. N 166. p. 382–389.

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

Tsunomori F., Kuo T. A mechanism for radon decline prior to the 1978 Izu-Oshima-Kinkai earthquake in Japan // *Radiation Measurements*. 2010. N 45. P. 139–142.

Daily and seasonal radon variability in the underground low-background laboratory in Belgrade, Serbia / V. Udovičić, J. Filipović, A. Dragić, R. Banjanac, D. Joković, D. Maletić, B. Grabež, N. Veselinović // *Radiation Protection Dosimetry*. 2014. Vol. 160. P. 62–64.

The use of mapped geology as a predictor of radon potential in Norway / R. Watson, M. Smethurst, G. Ganerod, I. Finne, A. Rudjord // *Journal of Environmental Radioactivity*. 2017. Vol. 166. P. 341–354.

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

Monitoring of Radon and Physical and Chemical Characteristics in Underground Waters of the Southern Baikal Region

A. K. Seminsky

Institute of the Earth's Crust SB RAS, Irkutsk

K. Zh. Seminsky

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

Abstract. The purpose of the study was to study the general regularities of radon emanations and the deviation of physical and chemical characteristics in the underground waters of the Southern Baikal region. Measurements of volumetric activity of radon were made on the radiometer PPA-01M-03, physical and chemical characteristics, which were measured on Hanna HI 98129 Combo express analyzer. In addition to Q parameters and physical and chemical characteristics, seismic and meteorological data also analyzed for sampling days on the studied area. Reconnaissance testing of several dozens of groundwater sources located within the Southern Baikal region, to allow to organize the monitoring investigations on a series of water points. The sampling network consists of 8 ground water sources in Irkutsk and on the right (northern) bank of the Irkutsk reservoir. For which site every two weeks physical and chemical parameters of groundwater (including radon concentration) were determined, as well as meteorological and seismic activity in the region. Analysis of the database, including measurements of a set of parameters for six years (2012–2018), allows to make the following conclusions. 1. According to radioactivity, the ground water sources studied in the Southern Baikal region are divided into three groups (the 1-st mean radon concentration is about 15 Bq / l, the second one has the average radon concentration of about 30 Bq / l and the third group has the average radon concentration \approx 60 Bq / l), which, apparently, is determined with the conditions of recharge and groundwater formation. The change of Q during the monitoring period is 30-60 % of the average value of this parameter in the tested source. 2. According to physical characteristics, groundwaters studied in monitoring period are generally classified as cold and neutral with rigidity varying from «soft» to «very hard» in different sources. Absolute limits of chang-

es in the parameters variations are characterized by the following values: water temperature from 1,7 to 12 °C, i. e. $\Delta \approx 42,88$ % of the average water temperature in the source; hydrogen index from 7 to 9,9, $\Delta \approx 10$ % of the average value; conductivity index from 43 to 412 $\mu\text{S} / \text{cm}$, $\Delta \approx 18,52$ % of the average value; hardness from 85 to 833 Ppm, $\Delta \approx 14,08$ % of the average value; the flow rate from total absence of flow to 140 l / min, $\Delta \approx 87,82$ % of the average value. 3. Comparison of the monitoring schedules of the complex of the parameters showed that the radioactivity of groundwater, like most of the indicators studied, is largely determined by the climatic conditions of the Southern Baikal region. In this respect, the analyzed indicators are divided into three groups. For one of them the values are maximal in the cold months of the year (the amount of dissolved radon, the hydrogen index of water and atmospheric pressure). The parameters of the other group have the opposite view (water temperature and flow rate of water sources, temperature and humidity of air). A feature of the parameters from the third group (hardness and electric conductivity of water, as well as the index of seismic activity) is that their fluctuations do not show significant dependence on the period of the year, but they differ by good intragroup convergence.

Keywords: groundwater, monitoring, radon, physical and chemical characteristics, Southern Baikal region.

For citation: Seminsky A.K., Seminsky K.Zh. Monitoring of Radon and Physical and Chemical Characteristics in Underground Waters of the Southern Baikal Region. *The Bulletin of Irkutsk State University. Series Earth Sciences*, 2018, vol. 26, pp. 84-98. <https://doi.org/10.26516/2073-3402.2018.26.84> (in Russian)

References

Aleksandrov V.K., Demin A.V., Mordovskaya T.V., Taskin A.P., Khrenov P.M., Lebedev S.P. *Karta razlomov yuga Vostochnoj Sibiri* [Map of faults in the south of Eastern Siberia]. Scale 1: 1 500 000. Ed. by. P.M. Xrenov. M-Geology of the USSR, VOSTSIBNIIGGIMS and MS, Irkutsk, 1982. 6 p. (In Russian)

Baikal'skii filial geofizicheskoi sluzhby [Baikal branch of geophysical service] [electronic resource]. Access mode: <http://seis-bykl.ru/> Main event directory. (Date of the application: 10.02.2016). (In Russian)

Vlasov N.A., Tkachuk V.G., Tolstikhin N.I. *Mineral'nye vody Yuzhnoi chasti Vostochnoi Sibiri* [Mineral waters of the southern part of Eastern Siberia]. In 2 vol. Moscow, Publ. house of the USSR AS, 1962. (In Russian)

Kulikov G.V., Zhelvakov A.V., Bondarenko S.S. *Mineral'ny'e lechebny'e vody` SSSR: Spravochnik* [Mineral medicinal waters of the USSR: Handbook]. Moscow, Nedra Publ., 1991, 339 p.

Maksimovskii V.A., Reshetov V.V., Kharlamov M.G. *Karta radonopasnosti Rossii* [Map of the radon risk of Russia]. 1:10 000 000. Ed. A.A. Smyslova. Moscow, APb. SPbGGI. 1995. 1 p. (In Russian)

Raspisanie pogody [Weather schedule] Rp5.ru [Electronic resource]. Main event directory: <http://rp5.ru/> Weather archive in Irkutsk. (Date of the application: 10.02.2016). (In Russian)

Seminskii A.K., Tugarina M.A. *Osobennosti raspredeleniya radona v podzemnykh vodakh Baikalskogo regiona* [Features of radon distribution in the underground waters of the Baikal region]. *Geologiya, poiski i razvedka poleznykh iskopaemykh i metody geologicheskikh issledovaniy. Materialy Vseross. nauchno-tekhnicheskoi konferentsii s mezhd. uchastiem «GEONAUKI-2013»: aktual'nye problemy izucheniya nedr* [Geology, prospecting and exploration of minerals and methods of geological research: Materials of the All-Russian Scientific and Technical Conference with Int. «GEONAUKI-2013»: actual problems of subsoil study]. Irkutsk, 2013, pp. 133-137. (In Russian)

Seminskiy K.Zh., Seminskiy A.K. *Radon v podzemnykh vodakh 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)

Sultankhadzhaev A.N., Khitarov N.I. *Gidrogeoseismologicheskie issledovaniya v vostochnoi Fergane* [Hydrogeoseismological studies in eastern Fergana]. Uzbekistan, Publishing house of the Institute of Seismology, 1978. 189 p. (In Russian)

Cioli G., Voltaggio M., Tuccimei P., Soligo M., Pasculli A., Beaubien S., Bigi S. Geographically weighted regression and geostatistical techniques to construct the geogenic radon potential map of the Lazio region: A methodological proposal for the European Atlas of Natural Radiation. *Journal of Environmental Radioactivity*, 2017, vol. 166, pp. 355-375.

Cucos A., Papp B., Dicu T., Moldovan M., Burghel B., Moraru T., Tenter A., Cosma C. Residential, soil and water radon surveys in north-western part of Romania. *Journal of Environmental Radioactivity*, 2017, vol. 166, pp. 412-416.

Erdogan M., Eren N., Demirel S., Zedef V. Determination of radon concentration levels in wellwater in Konya, Turkey. *Radiat. Protect. Dosimetry*. 2013, vol. 156, no. 4, pp. 489-494.

Forkapic S., Maletic D., Vasin J., Bikit K., Mrdja D., Bikit I., Udovicic V., Banjanac R. Correlation analysis of the natural radionuclides in soil and indoor radon in Vojvodina, Province of Serbia. *Journal of Environmental Radioactivity*, 2017, vol. 166, pp. 403-411.

Friedmann H., Baumgartner A., Bernreiter M., Graser J., Gruber V., Kabrt F., Kaineder H., Maringer F., Ringer W., Seidel C., Wurm G. Indoor radon, geogenic radon surrogates and geology, Investigations on their correlation. *Journal of Environmental Radioactivity*, 2017, vol. 166, pp. 382-389.

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

Tsunomori F., Kuo T. A mechanism for radon decline prior to the 1978 Izu-Oshima-Kinkai earthquake in Japan. *Radiation Measurements*, 2010, vol. 45, pp. 139-142.

Udovičić V., Filipović J., Dragić A., Banjanac R., Joković D., Maletić D., Grabež B., Veselinović N. Daily and seasonal radon variability in the underground low-background laboratory in Belgrade, Serbia. *Radiation Protection Dosimetry*, 2014, vol. 160, pp. 62-64.

Watson R., Smethurst M., Ganerod G., Finne I., Rudjord A. The use of mapped geology as a predictor of radon potential in Norway. *Journal of Environmental Radioactivity*, 2017, vol. 166, pp. 341-354.

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

Семинский Александр Константинович
аспирант, старший лаборант
Институт земной коры СО РАН
Россия, 664033, г. Иркутск,
ул. Лермонтова, 128
тел.: (3952) 42-30-27
e-mail: zzzsancheszzz@gmail.com

Seminsky Aleksandr Konstantinovich
Postgraduate, Senior Laboratory Assistant
Institute of the Earth's Crust SB RAS
128, Lermontov st., Irkutsk, 664033,
Russian Federation
tel.: (3952) 42-30-27
e-mail: zzzsancheszzz@gmail.com

Семинский Константин Жанович
доктор геолого-минералогических наук,
ведущий, лаборатория тектонофизики
Институт земной коры СО РАН
Россия, 664033, г. Иркутск,
ул. Лермонтова, 128
тел.: (3952) 42-30-27
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 Mineralogy),
Head, Laboratories of Tectonophysics
Institute of the Earth's Crust SB RAS,
128, Lermontov st., Irkutsk, 664033,
Russian Federation
tel.: (3952) 42-30-27
Scientific Center SB RAS
134, Lermontov st., Irkutsk, 664033,
Russian Federation
e-mail: seminsky@crust.irk.ru

Дата поступления: 03.08.2018

Received: August, 03, 2018