

Оригинальная статья / Original article

УДК 556.06+556.043

<http://dx.doi.org/10.21285/2541-9455-2017-40-4-57-68>

РАДОН В ПОДЗЕМНЫХ ВОДАХ ЮЖНОГО ПРИБАЙКАЛЬЯ: РЕЗУЛЬТАТЫ МОНИТОРИНГА И ПРОГНОЗ КОНЦЕНТРАЦИЙ

© А.К. Семинский^а

^аИнститут земной коры СО РАН,

Российская Федерация, 664033, г. Иркутск, ул. Лермонтова, 128.

РЕЗЮМЕ. Цель. Изучить общие закономерности эманацій радона, растворенного в подземных водах Южного Прибайкалья, и выявить главные факторы, влияющие на эманації, а также предложить способ, позволяющий по данным однократного отбора пробы прогнозировать изменения концентрации радона для отдельно взятого водопрооявления в течение года. **Метод.** Содержание радона в каждом из выбранных для исследования источников измерялось один раз в две недели. Для определений объемной активности радона (Q , Бк/л) использовался радиометр РРА-01М-03. Кроме параметра Q фиксировались метеоданные в дни отбора проб, а также данные о сейсмической активности на территории исследований. Количественный анализ осуществлялся с применением стандартных методов статистики (кластерный, корреляционный и Фурье анализы). **Результаты.** Создана мониторинговая сеть из восьми пунктов опробования. Подземные воды исследуемой территории являются нерадоновыми ($Q \leq 185$ Бк/л). Изучаемые водопрооявления разделены на три группы по среднему содержанию радона в воде за период опробования: первая – $Q_{cp} \approx 15$ Бк/л, вторая – $Q_{cp} \approx 30$ Бк/л, третья – $Q_{cp} \approx 60$ Бк/л. Содержание радона в воде колеблется, ΔQ составляет 30–60 % от средней величины в опробуемом источнике. Анализ Фурье позволил разложить сложные колебания параметра Q на простейшие гармоники: первого порядка (длина волны ≈ 365 дней), второго порядка (≈ 126 дней) и третьего порядка (≈ 30 дней). Все анализируемые величины по степени зависимости друг от друга делятся на три основных кластера. Первый – параметры Q для разных источников, а второй и третий – разнотипные факторы формирования эманаціонного поля: внешние (метеорологические условия) и внутренние (землетрясения разного энергетического класса). Корреляционный анализ позволил уточнить, что параметр Q характеризуется прямой связью с давлением, а его зависимость от температуры и влажности проявляется лишь на уровне тенденций. На основе выявленных закономерностей была разработана методика составления прогноза концентрации растворенного газа в подземных водах. **Выводы.** Предполагаемой причиной отличия рядов измерений параметра Q , полученных для разных водопрооявлений, являются условия питания и формирования подземных вод. Согласно анализу Фурье, выявлены три основных вида гармоник, которые по-разному представлены в кривых различного типа, что свидетельствует о сложных взаимоотношениях факторов. Согласно результатам статистического анализа, изученные параметры образуют три кластера. Факторы, влияющие на газовые эманації, можно разделить на внешние и внутренние, причем воздействие на концентрацию радона первых оказалось в период мониторинга сильнее, чем влияние вторых. По данным корреляционного анализа объемная активность радона имеет устойчивую зависимость от давления, а также чуть менее слабую связь с температурой и влажностью. Количественный анализ результатов применения предложенного метода прогнозирования концентрации растворенного радона показал, что сходимость расчета в среднем составила 80 %.

Ключевые слова: радон, вода, мониторинг, статистика, прогноз.

Формат цитирования: Семинский А.К. Радон в подземных водах Южного Прибайкалья: результаты мониторинга и прогноз концентраций // Известия Сибирского отделения Секции наук о Земле Российской академии естественных наук. Геология, разведка и разработка месторождений полезных ископаемых. 2017. Т. 40. № 4. С. 57–68. DOI: 10.21285/2541-9455-2017-40-4-57-68

^аСеминский Александр Константинович, аспирант лаборатории тектонофизики, e-mail: zzzsancheszzz@gmail.com
Aleksandr K. Seminsky, Postgraduate of the Laboratory of Tectonophysics, e-mail: zzzsancheszzz@gmail.com

RADON IN UNDERGROUND WATERS OF SOUTHERN TRANSBAIKALIA: MONITORING RESULTS AND FORECAST OF CONCENTRATIONS

A.K. Seminsky

Institute of the Earth's crust SB RAS,
128 Lermontov St., Irkutsk 664033, Russian Federation

ABSTRACT. The **Purpose** of the paper is to study the general patterns of emanations of radon dissolved in the underground waters of the Southern Baikal region, to identify the main factors affecting the emanations and to propose a method enabling the prediction of changes in radon concentration for a single water manifestation during a year based on a single sample selection. **Methods.** The radon content in each of the sources chosen for the study was measured 1 time every two weeks. The volume activity of radon (Q , Bq/l) was measured using a radiometer PPA-01M-03. In addition to the Q parameter, weather data on the days of sampling were recorded, as well as the data on seismic activity in the study area. Quantitative analysis was carried out using standard statistical methods (cluster, correlation and Fourier analyzes). **Results.** A monitoring network of eight sampling points was created. Underground waters of the investigated area are found to be non-radon ($Q \leq 185$ Bq/l). The studied water manifestations are divided into three groups according to the average radon content in water during the sampling period: 1st group – Q average ≈ 15 Bq/l, 2nd group – Q average ≈ 30 Bq/l and 3rd group – Q average ≈ 60 Bq/l. The radon content in water varies; ΔQ is 30-60% of the mean value in the test source. The Fourier analysis allowed to factorize the complex oscillations of the Q parameter into the simple harmonics: of the first order (the wavelength is about 365 days), of the second order (≈ 126 days) and of the third order (≈ 30 days). All the analyzed values are divided into three main clusters according to their degree of mutual dependence. The first is Q parameters for different sources, the second and third are various factors of emanation field formation: external (meteorological conditions) and internal (earthquakes of different energy class). The correlation analysis made it possible to specify that the parameter Q has a direct correlation with pressure, while its dependence on temperature and humidity is manifested only at the level of trends. Based on the revealed regularities a forecasting methodology for dissolved gas concentrations in groundwaters has been developed. **Conclusions.** The expected reason for the difference in the series of the Q parameter measurements obtained for different water manifestations are the conditions for the recharge and formation of groundwaters. Based on Fourier analysis three main types of harmonics have been identified. They are differently represented in the curves of various types, which is indicative of the complex correlation of factors. According to the results of statistical analysis, the studied parameters form three clusters. The factors affecting gas emanations can be classified into external and internal, whereas the effect of the former on radon concentration has appeared to be stronger in the monitoring period than the influence of the latter. The correlation analysis data have shown that the volume activity of radon is regularly dependent on pressure, slightly less dependent on temperature and humidity. The quantitative analysis of the application results of the proposed forecasting method of dissolved radon concentrations has shown the averaged 80% convergence of calculations.

Keywords: radon, water, monitoring, statistics, forecast

For citation: Seminsky A.K. Radon in underground waters of southern Transbaikalia: monitoring results and forecast of concentrations. Proceedings of the Siberian Department of the Section of Earth Sciences of the Russian Academy of Natural Sciences. Geology, Exploration and Development of Mineral Deposits, 2017, vol. 40, no. 4, pp. 57–68. (In Russian). DOI: 10.21285/2541-9455-2017-40-4-57-68

Введение

Изучение временных изменений концентрации радона в подземных водах имеет практическую значимость для многих аспектов жизнедеятельности человека. Это связано с существенной вариативностью эманаций, которые при оценке объемной активности радона в одном водоисточнике могут изменяться более чем на порядок. Исследования, заключающиеся в регулярных замерах параметра Q и

всестороннем анализе временных рядов получаемых данных, позволяют выявить особенности среднегодовых и сезонных колебаний, а также изучить характер зависимости этого параметра от различных факторов. Установленные в ходе подобного анализа тенденции могут использоваться в прогнозных оценках концентрации радона, что особенно актуально для районов с повышенной радоновой активностью. Как следствие, существует

множество публикаций, посвященных анализу данных эманационного мониторинга подземных вод для полигонов с различными природными обстановками [1–4].

На территории Байкальского региона массовое опробование водопроявлений проводилось в середине прошлого столетия в составе площадных гидрогеологических исследований, которые осуществлялись с целью изучения гидроминеральных ресурсов Восточной Сибири. В рамках комплексного анализа замерялась активность радона (Q , Бк/л), растворенного в воде. В результате проведенных работ была получена информация о пространственном распределении источников и количественном содержании радиоактивного газа в подземных водах [5, 6]. Основным интерес представляли водопроявления, относящиеся, согласно существующей классификации, к собственно радоновым ($Q \geq 185$ Бк/л).

Следует отметить, что режимные наблюдения за параметром Q на территории Восточной Сибири проводились только в курортно-медицинских учреждениях для контроля качества лечебных вод при эксплуатации природных радоновых источников. Это связано с тем, что при длительном воздействии на организм человека повышенные концентрации радон могут представлять опасность для здоровья, а бальнеологический эффект достигается нормированием времени процедуры в зависимости от концентрации радиоактивного газа, растворенного в воде. По причине того, что мониторинг параметра Q имел прикладную направленность, всесторонний анализ длинных рядов данных проведен не был.

Работы по изучению временных флуктуаций концентрации растворенного радона в пределах Байкальского региона особенно актуальны для урбанизированной территории Южного Прибайкалья, часть которой принадлежит к Байкальской рифтовой зоне, характеризующейся

сложным тектоническим строением, интенсивной сейсмичностью, а также повышенной радоновой опасностью [7]. Исследования прогностической направленности с целью поиска эманационных предвестников сильных землетрясений начаты на данной территории сравнительно недавно [8, 9]. Однако до сих пор практически не изучены общие закономерности эманаций и не выявлены главные факторы, на них влияющие. Кроме того, актуальна разработка метода, с помощью которого можно с определенной долей вероятности по данным однократного отбора пробы прогнозировать изменения концентрации радона для отдельно взятого водопункта в течение года.

Перед исследованием были поставлены следующие задачи: 1) выбрать на территории Южного Прибайкалья опорную сеть источников подземных вод для эманационного мониторинга и на основе получаемых данных составить длинные ряды измерений объемной активности радона; 2) проанализировать полученный массив значений на качественном уровне и установить наиболее общие закономерности временных вариаций; 3) сопоставить на базе статистического анализа ряды измерений объемной активности радона с вариациями таких параметров, как энергетический класс землетрясений (происходящих в дни отбора проб), температура и влажность воздуха, атмосферное давление, и установить факторы, оказывающие значимое влияние на эманации; 4) на основе полученных результатов разработать и применить универсальную модель прогнозирования концентрации растворенного радона, учитывающую закономерности ее вариаций в каждом конкретном источнике.

Методы исследования и фактический материал

Содержание (концентрация) радона в каждом источнике измерялось

один раз в две недели из проб объемом 100 мл. Для определений объемной активности радона использовался радиометр РРА-01М-03 с пределом погрешности $\approx 30\%$. Кроме данных о радоновой активности к анализу привлекалась информация о метеоусловиях (температуре, давлении, влажности), а также энергетическом классе сейсмических событий, произошедших в регионе за время отбора проб [10, 11]. В итоге был создан массив количественных данных. Для каждого опробуемого источника формировались ряды измерений, состоящие из набора параметров (содержание радона в воде, атмосферное давление, влажность, температура воздуха и энергетический класс сейсмического события), выстроенных в хронологическом порядке. Основой для исследований на качественном уровне были графики вариаций перечисленных параметров во времени, соответствующих каждому пункту мониторинга. Количественная обработка рядов измерений осуществлялась с применением стандартных методов статистики (кластерный, корреляционный и Фурье анализы).

Для решения первой задачи было проведено рекогносцировочное опробование более 50 источников подземных вод на территории Южного Прибайкалья (рис. 1). Согласно нашим предыдущим исследованиям [12], в качестве пунктов мониторинга лучше всего подходят источники подземных вод с незастойным режимом водообмена или малым доступом кислорода к зеркалу водной поверхности, функционирующие круглогодично, для которых параметр Q изменяется в следующих пределах: $16 \leq Q \leq 99$ Бк/л. Такие источники на территории Южного Прибайкалья являются аномальными по содержанию радиоактивного газа, вариативность концентрации которого дает возможность отчетливо наблюдать сезонную изменчивость и аномальные всплески. Водопроявления с concentra-

цией растворенного радона в воде выше 100 Бк/л также могут использоваться для мониторинговых наблюдений, но они практически не встречаются на исследуемой площади. 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. В соответствии с перечисленными критериями была создана сеть регулярных опробований из восьми источников (семь родников и одна скважина), которые располагаются в г. Иркутске и на правом берегу водохранилища (см. рис. 1), то есть принадлежат к зоне влияния крупного Ангарского разлома на отрезке Листвянка – Иркутск [13].

Результаты

В целом подземные воды исследуемого района, согласно существующей классификации по параметру Q [6], являются нерадоновыми ($Q \leq 185$ Бк/л). Средний показатель по изучаемым водопроявлениям составил примерно 4 Бк/л, однако в источниках, вошедших в сеть регулярных опробований, концентрация этого газа превышает фоновые значения в десятки раз [9].

Анализ рядов мониторинговых измерений, полученных в течение пяти последних лет, показал, что содержание радона в воде колеблется, причем ΔQ составляет 30–60 % от средней величины данного параметра в опробуемом источнике (рис. 2). Это превышает среднюю погрешность измерений прибора и, следовательно, является действительными колебаниями концентрации. Абсолютным минимальным значением Q на территории Южного Прибайкалья 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.

Исследуемые водопрооявления целесообразно разделить на три группы по среднему содержанию радона в воде за период опробования: первая – $Q_{cp} \approx 15$ Бк/л, вторая – $Q_{cp} \approx 30$ Бк/л, третья – $Q_{cp} \approx 60$ Бк/л (рис. 3). Кроме абсолютных значений параметра Q графики его временных вариаций, построенные для источников из разных групп, характеризуются некоторыми 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 (рис. 3, А): 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 (рис. 3, 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 (рис. 3, В): в них также происходит постепенное изменение концентрации радона, но иногда фиксируются аномальные всплески содержания радиоактивного газа.

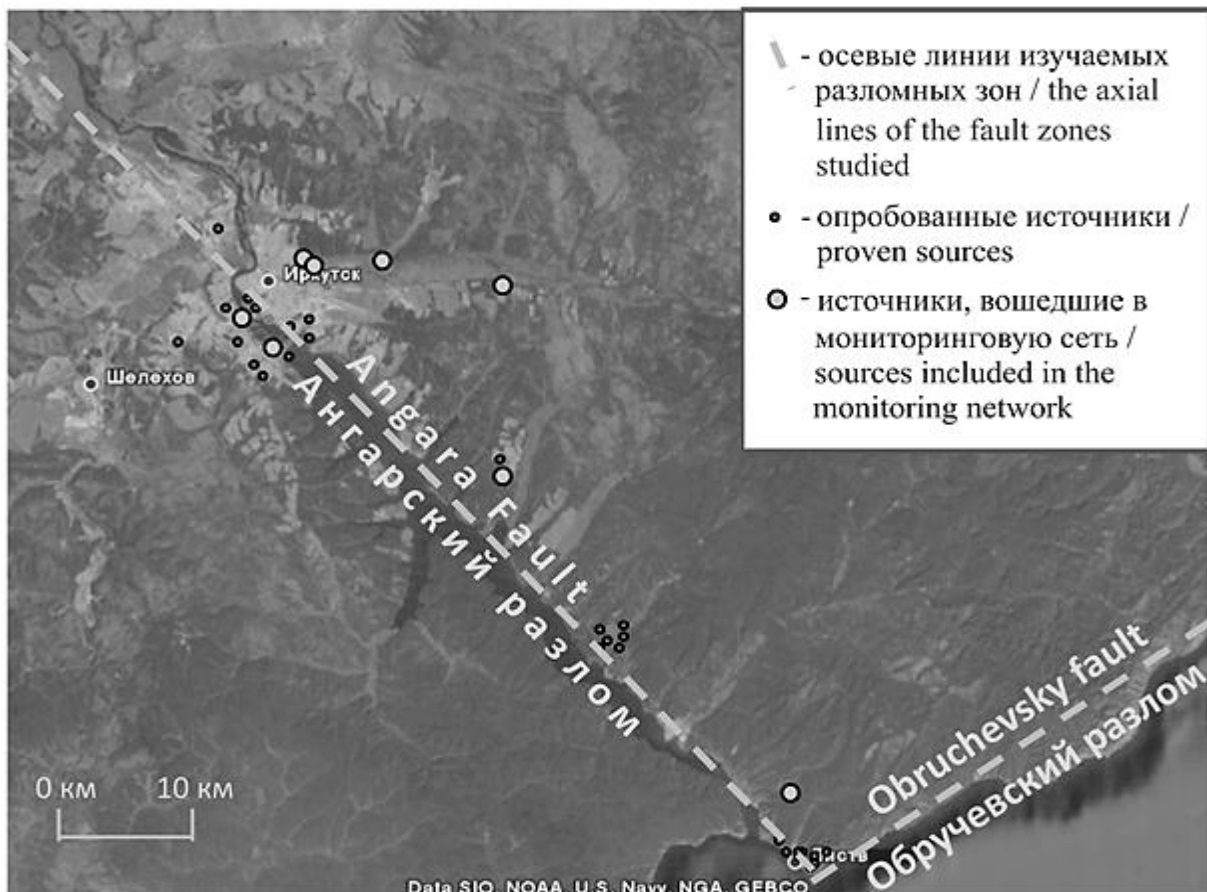


Рис. 1. Схема расположения опробованных водопрооявлений
Fig. 1. Diagram of tested water manifestation locations

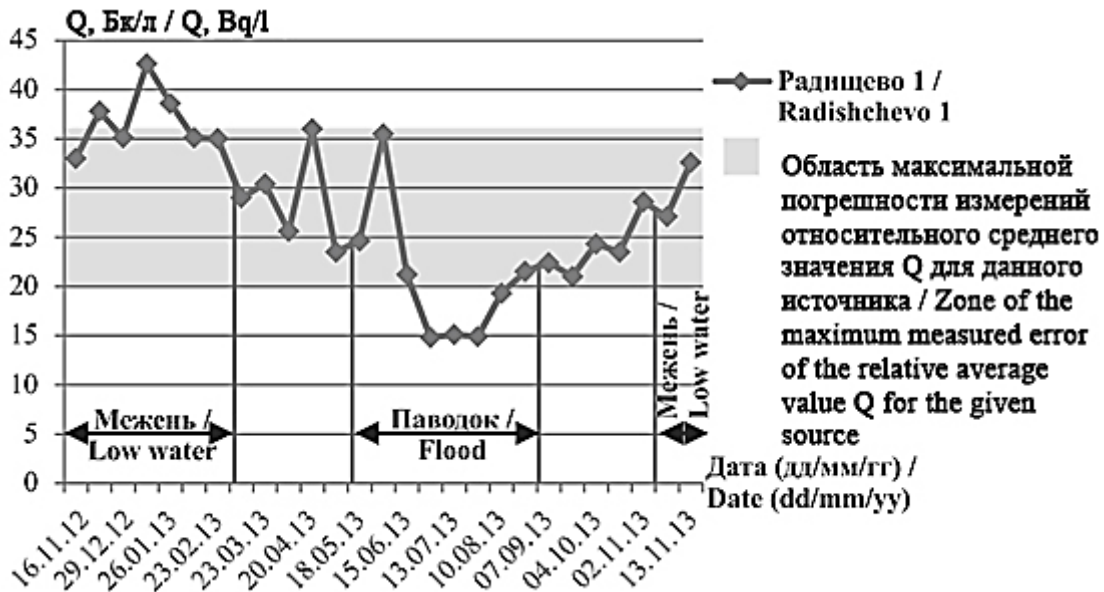


Рис. 2. График временных изменений концентрации радона в подземных водах источника, расположенного в предместье Радищево (г. Иркутск)
 Fig. 2. Graphs of temporary changes in radon concentration in the underground waters of the source located in the suburb of Radishchevo (the city of Irkutsk)

Материалы пятилетних измерений позволили рассчитать среднемесячную концентрацию радона в воде каждого исследуемого источника. На основе полученных данных построены графики, отражающие характер изменчивости параметра Q за год. Анализ графиков показал, что водопункты, относящиеся по среднегодовой концентрации радона к разным группам, имеют также отличия в характере вариативности: источники из первой группы ($Q_{ср} \approx 15$ Бк/л) имеют пологие графики, общая линия тренда просматривается слабо, а $\Delta Q \approx 10$ Бк/л. Водопроявления из второй группы ($Q_{ср} \approx 30$ Бк/л) характеризуются выраженными колебаниями во времени, четко наблюдаемой общей линией тренда, $\Delta Q \approx 20$ Бк/л. Третья группа источников ($Q_{ср} \approx 60$ Бк/л) имеет резко выраженные годовые изменения, общая линия тренда наблюдается, однако присутствуют внутригрупповые особенности, $\Delta Q \approx 40$ Бк/л. Наличие и характер отличительных признаков, а также совпадение количественных оценок с результатами анализа графиков монито-

ринга подтверждают объективность разделения источников на группы.

Фрагмент графика, представленный в качестве примера на рис. 2, отражает общую тенденцию изменения концентрации радона в воде других пунктов мониторинга. Максимальный показатель 42,6 Бк/л в источнике со среднегодовым значением 29,19 Бк/л был зафиксирован в январе. 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 из родников только вместе с водой. Минимальное значение $Q \approx 15$ Бк/л для рассматриваемого источника было зафиксировано в июне, июле и августе. Эти месяцы относятся к паводковому периоду, когда газ может свободно выходить на поверхность через почву и, следовательно, в меньшей степени концентрироваться в подземных водах. Кроме того, в этот период осуществляется питание подземных вод атмосферными осадками,

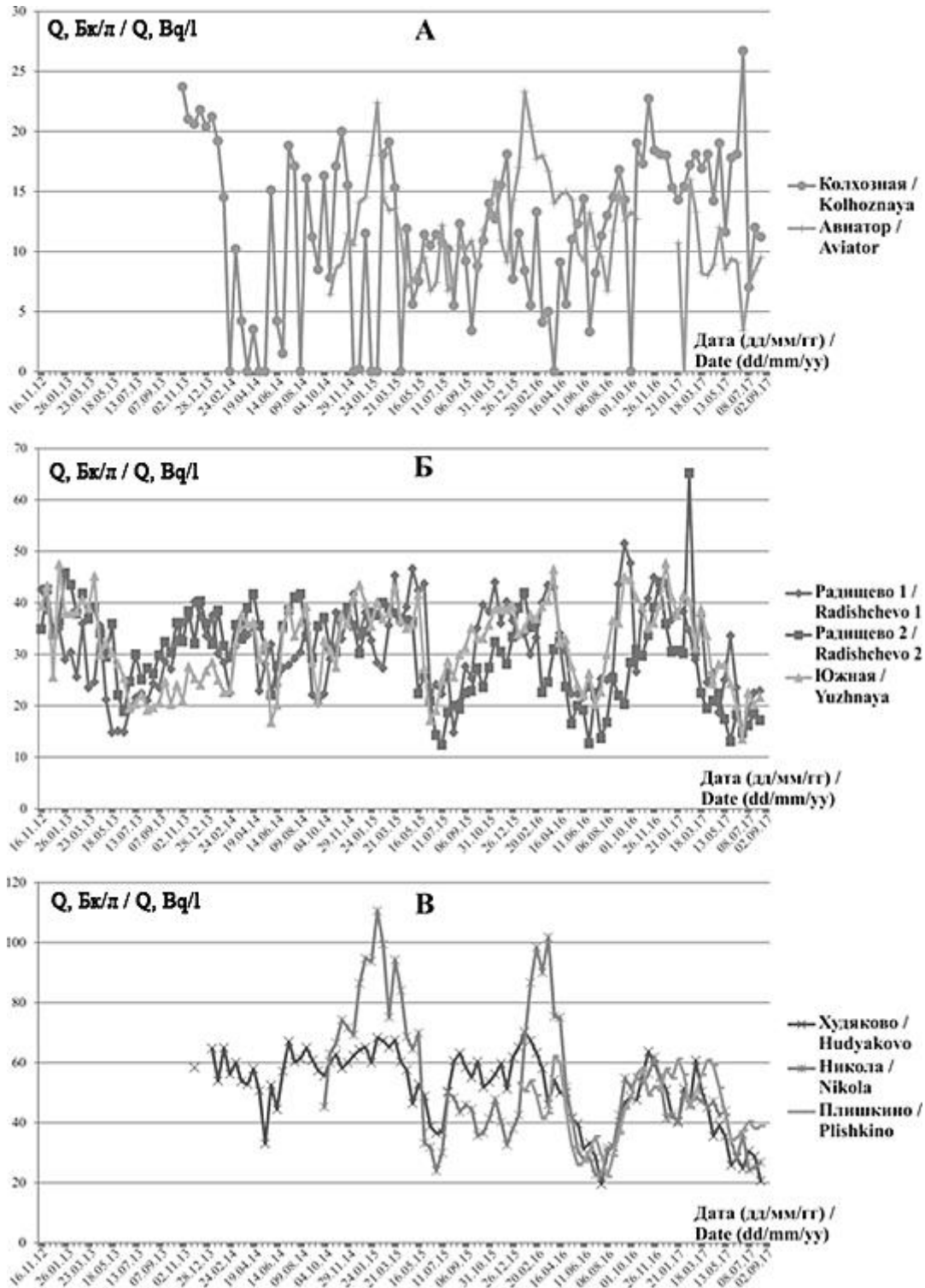


Рис. 3. Графики колебаний радоновой активности в восьми изучаемых водопроявлениях за период мониторинга:

А – источники, относящиеся к первой группе; Б – источники, относящиеся ко второй группе; В – источники, относящиеся к третьей группе

Fig. 3. Graphs of radon activity variations in 8 water manifestations studied during the monitoring period:

A – sources belonging to the first group; Б – sources belonging to the second group; В – sources belonging to the third group

которые благодаря отсутствию в них радона существенно снижают концентрацию газа в некоторых источниках подземных вод.

Для решения третьей задачи были построены и проанализированы временные ряды изменений температуры, давления, влажности, а также энергетического класса сейсмических событий. Детально результаты этого исследования представлены в работе [14]. Колебательный характер изменчивости всех анализируемых параметров во времени позволил использовать анализ Фурье для разложения кривых мониторинга на простейшие колебания с разными длинами волн. На рис. 4, А в качестве примера представлена периодограмма, построенная по результатам мониторингового опробования источника подземных вод на территории города Иркутска (Южная). Пики на графике соответствуют выявленным для данного источника периодам гармонических колебаний. Интерпретация результатов проведенного анализа дает возможность разделить выделенные гармоники (с погрешностью до 20 дней) на типы, отличающиеся друг от друга длиной волны: первого порядка (период ≈ 365 дней), второго порядка (≈ 126 дней) и третьего порядка (≈ 30 дней). Колебания с периодом, равным одному году, проявились для значений Q из трех источников и для метеорологических параметров. Колебания второго порядка были зафиксированы практически для всех анализируемых параметров, кроме величин Q из двух водопунктов и атмосферного давления. Гармоника с наименьшим периодом была выявлена для каждой из анализируемых кривых, но границы ее проявления определены менее достоверно в связи с недостаточной для их уточнения частотой опробования. То, что для каждого порядка гармоник характерен определенный набор параметров, в которых она проявляется, свидетельствует о «защищенности» некоторых величин от возде-

ствия циклических процессов, оказывающих влияние на остальные кривые.

Для разделения всех рассматриваемых параметров (значения Q , а также метеоданные и энергетические классы сейсмических событий) по степени зависимости друг от друга использовался кластерный анализ. На рис. 4, Б представлена дендрограмма, построенная по результатам кластерного анализа. Наиболее отчетливо выделяются три основных кластера. Первый образуют параметры Q для разных источников, а второй и третий – 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. Дополнительно проведенный корреляционный анализ позволил уточнить, что объемная активность радона характеризуется прямой связью с давлением, а ее зависимость от температуры и влажности проявляется лишь на уровне тенденций. Взаимосвязь между сейсмическими событиями и выходом радиоактивного газа на данном этапе исследований установить не удалось.

Периодический характер колебательных изменений радоновой активности во времени предполагает возможность количественного прогнозирования этой величины. Для этого на основе массивов данных о флуктуациях параметра Q , полученных за пять лет мониторинговых исследований, разработана прогностическая модель расчета концентрации растворенного в подземных водах радона.

Представление разнотипных оценок параметра Q в процентном соотно-

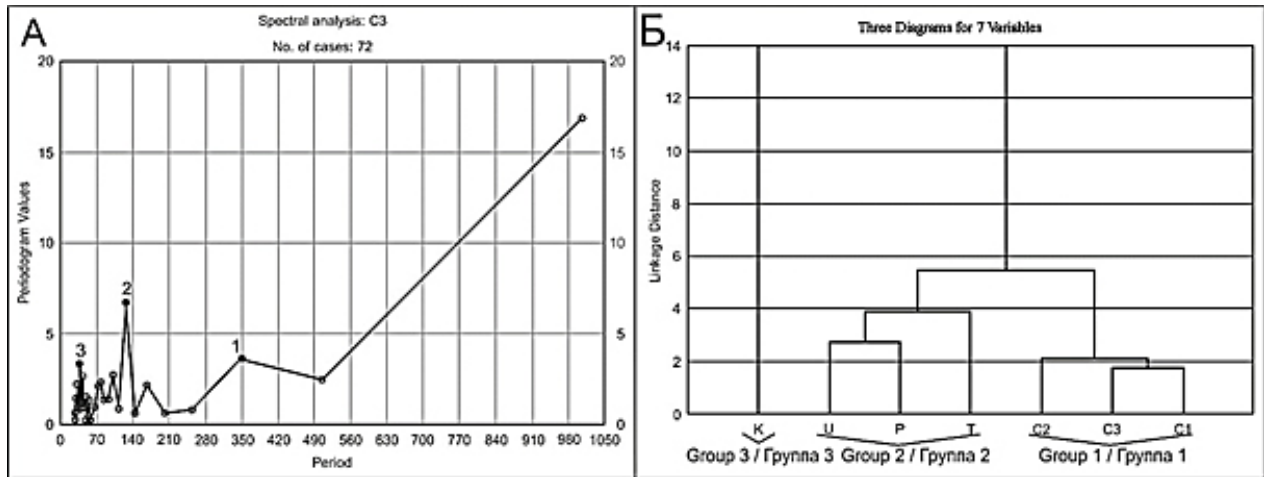


Рис. 4. Графическая интерпретация результатов статистического анализа:
 А – периодограмма колебаний радоновой активности во времени для источника Южная:
 1 – гармоника первого порядка (период ≈ 365 дней), 2 – гармоника второго порядка (≈ 126 дней),
 3 – гармоника третьего порядка (≈ 30 дней); В – дендрограмма взаимных связей семи параметров:
 Group 1 – параметры Q для разных источников (C1 – Радищево1, C2 – Радищево2, C3 – Южная),
 Group 2 – метеорологические условия (T – температура, P – давление, U – влажность),
 Group 3 – землетрясения разного энергетического класса (K – энергетический класс)

Fig. 4. Graphical interpretation of statistical analysis results:

A – periodogram of radon activity variations in time for the Yuzhnaya source:
 1 – first order harmonic (period of ≈ 365 days), 2 – second order harmonic (≈ 126 days),
 3 – third order harmonic (≈ 30 days); B – dendrogram of mutual relations of seven parameters:
 Group 1 – Q parameters for different sources (C1 – Radishchevo1, C2 – Radishchevo2, C3 – Yuzhnaya),
 Group 2 – meteorological conditions (T – temperature, P – pressure, U – humidity),
 Group 3 – earthquakes of different energy class (K – energy class)

шении позволило анализировать их в рамках одной выборки. За сто процентов принято максимальное среднемесячное значение Q в воде для каждого источника. Прогнозное значение находится из пропорции

$$\frac{Q_1}{Q_2} = \frac{Q_{\text{факт}}}{Q_{\text{расч}}},$$

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, $Q_{\text{факт}}$, Бк/л – результат фактического измерения количества радона в воде, $Q_{\text{расч}}$, Бк/л – искомое прогнозное значение.

Применение предложенной пропорции позволило сделать прогноз для всех пунктов мониторинга на год. Расчет производился на основе результатов еди-

ничного опробования. Количественный анализ теоретических и фактических данных показал, что сходимость прогноза в среднем составила 80 %. Из 92 полученных значений в 6 точность расчета составила менее 60 %, в 17 случаях колебалась от 60–80 %, и в оставшихся 69 точность прогноза превысила 80 %. Такой уровень достоверности теоретических расчетов подтверждает кондиционность разработанной модели.

Выводы

1. Для территории Южного Прибайкалья организована сеть эманационного мониторинга из восьми источников подземных вод, отвечающих всем необходимым требованиям. Создан массив количественных показателей, в который кроме замеров содержания радона в воде вошли известные для региона сейсмо- и метеоданные.

2. Анализ рядов пятилетних изменений показал, что подземные воды опробованных источников Иркутского района по содержанию радона могут быть отнесены к нерадоновым [6], а колебание концентрации растворенного газа составляет 30–60 % от средней величины в опробуемом источнике. Изученные за период опробования водопроявления можно по величине Q_{cp} разделить на три группы: первая – $Q_{cp} \approx 15$ Бк/л, вторая – $Q_{cp} \approx 30$ Бк/л, третья – $Q_{cp} \approx 60$ Бк/л. Предполагаемой причиной отличия рядов измерений параметра Q , полученных для источников из разных групп, являются условия питания и формирования подземных вод.

3. Согласно анализу Фурье, выявлены три основных вида гармоник: первого порядка (365 дней), второго порядка (126 дней) и третьего порядка (30 дней). Гармоники по-разному представлены в кривых различного типа, что свидетельствует о сложных взаимоотношениях факторов. Согласно результатам статистического анализа, изученные параметры образуют три кластера, к первому из которых относятся уровни объемной активности радона в воде опробуемых

источников, ко второму – метеорологические параметры, а к третьему – энергетический класс зафиксированных сейсмических событий. Наиболее тесные межкластерные связи установлены между величинами Q и метеопараметрами. Таким образом, факторы, влияющие на газовые эманации, можно разделить на внешние и внутренние, причем воздействие на концентрацию радона первых оказалось в период мониторинга сильнее, чем влияние вторых. По данным корреляционного анализа объемная активность радона имеет устойчивую прямую зависимость от давления, но слабую взаимосвязь с температурой и влажностью.

4. Разработана и применена модель прогнозирования концентрации растворенного радона в источниках подземных вод. Количественный анализ результатов прогнозирования показал, что сходимость прогноза в среднем составила 80 %.

Исследования проводились в связи с выполнением интеграционной программы ИНЦ СО РАН «Фундаментальные исследования и прорывные технологии как основа опережающего развития Байкальского региона и его межрегиональных связей (0341-2015-0001)».

Библиографический список

1. Султанходжаев А.Н., Хитаров Н.И. Гидрогеоэссмологические исследования в восточной Фергане. Ташкент: Изд-во Института сейсмологии, 1978. 120 с.

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

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

4. Woith H. Radon earthquake precursor: A short review // European Physical

Journal. Special Topics. 2015. Vol. 224. P. 611–627.

5. Власов Н.А., Ткачук В.Г., Толстихин Н.И. Минеральные воды Южной части Восточной Сибири. В 2 т. М.: Изд-во АН СССР, 1962. Т. 1. 346 с. Т. 2. 198 с.

6. Куликов Г.В., Жевлаков А.В., Бондаренко С.С. Минеральные лечебные воды СССР: справочник. М.: Недра, 1991. 399 с.

7. Максимовский В.А., Решетов В.В., Харламов М.Г. Карта радоноопасности России. Масштаб 1:10000000 / под ред. А.А. Смылова. М., СПб., 1995.

8. Лопатин М.Н. Вариации концентраций растворенного радона в подземных водах Южного Прибайкалья при подготовке и реализации очагов землетрясений // Строение литосферы и геодинамика: материалы XXVI Всерос. молодежн. конф. Иркутск: Изд-во ИЗК СО РАН, 2015. С. 108–109.

9. 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 Всерос. науч.-техн. конф. с междунар. уч. «Геонауки-2013»: актуальные проблемы изучения недр. Иркутск: изд-во ИрГТУ, 2013. С. 133–137.

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

10.02.2016).

11. Архив погоды в Иркутске. Расписание погоды // Rp5.ru [Электронный ресурс]. URL: <http://rp5.ru> (дата обращения: 10.02.2016).

12. Семинский А.К. Систематизация источников подземных вод Прибайкалья и Забайкалья по содержанию радона: предварительные результаты // Строение литосферы и геодинамика: материалы XXVI Всерос. молодежн. конф. Иркутск: Изд-во ИЗК СО РАН, 2015. С. 164–166.

13. Карта разломов юга Восточной Сибири (масштаб 1:1500000) / под ред. П.М. Хренова. Л., 1982.

14. 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.

References

1. Sultankhodzhaev A.N., Khitarov N.I. *Gidrogeoseismologicheskie issledovaniya v vostochnoi Fergane* [Hydrogeo-seismological studies in eastern Fergana]. Tashkent: Institute of Seismology Publ., 1978, 120 p.

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

3. 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.

4. Woith H. Radon earthquake precursor: A short review. *European Physical Journal. Special Topics*, 2015, vol. 224, pp. 611–627.

5. 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: USSR Academy of Sciences Publ., 1962. Vol. 1, 346 p., vol. 2, 198 p.

6. Kulikov G.V., Zhevnikov A.V., Bondarenko S.S. *Mineral'nye lechebnye vody SSSR: spravochnik* [Mineral medicinal waters of the USSR: reference book]. Moscow: Nedra Publ., 1991, 399 p.

7. Maksimovskii V.A., Reshetov V.V., Kharlamov M.G. *Karta radonopasnosti Rossii. Masshtab 1:1000000* [Radon hazard map of Russia]. Moscow, St. Petersburg, 1995.

8. Lopatin M.N. Variations in the concentrations of dissolved radon in ground water of the Southern Baikal region in the preparation and implementation of earthquake foci. *Stroenie litosfery i geodinamika: materialy XXVI Vseros. molodezhn. konf.* [Lithosphere structure and geodynamics: Proceedings of the XXVI all-Russian youth conference]. Irkutsk: Institute of the Earth's crust SB RAS Publ., 2015, pp. 108–109. (In Russian).

9. Seminskii A.K., Tugarina M.A. Features of radon distribution in the underground waters of the Baikal region. *Geologiya, poiski i razvedka poleznykh iskopaemykh i metody geologicheskikh issledovaniy: materialy Vseros. nauch.-tekhn. konf. s mezhdunar. uch. «Geonauki-2013»: aktual'nye problemy izucheniya nedr* [Geology, prospecting and exploration of mineral resources and methods of geological research: Materials of the All-Russian Scientific and Technical Conference with international participation "Geonauki-2013": actual problems of subsoil study]. Irkutsk: Irkutsk State Technical University Publ., 2013, pp. 133–137. (In Russian).

10. *Osnovnoi katalog sobytii* [Main event catalog]. *Baikal'skii filial geofizicheskoi sluzhby* [Baikal branch of geophysical service]. Available at: <http://seis-bykl.ru> (accessed 10 February 2016).

11. *Arkhiv pogody v Irkutske. Raspisanie pogody* [Weather archive in Irkutsk.

Weather schedule]. Rp5.ru [Rp5.ru]. Available at: <http://rp5.ru> (accessed 10 February 2016).

12. Seminskii A.K. Systematization of groundwater sources in Baikal and Transbaikalian regions based on the radon content: preliminary results. *Stroenie litosfery i geodinamika: materialy XXVI Vseros. molodezhn. konf.* [Lithosphere structure and geodynamics: Proceedings of the XXVI all-Russian youth conference]. Irkutsk: Institute of the Earth's crust SB RAS Publ., 2015, pp. 164–166. (In Russian).

13. Khrenov P.M. *Karta razlomov yuga Vostochnoi Sibiri (mashtab 1:1500000)* [Map of the faults of the south of Eastern Siberia]. Leningrad, 1982.

14. Seminskii K.Zh., Seminskii A.K. Radon in groundwaters in the Baikal region and Transbaikalia: variations in space and time. *Geodinamika i tektonofizika* [Geodynamics and tectonophysics], 2016, vol. 7, no. 3, pp. 477–493. (In Russian).

Критерии авторства

Семинский А.К. написал статью и несет ответственность за плагиат.

Конфликт интересов

Автор заявляет об отсутствии конфликта интересов.

Статья поступила 24.10.2017 г.

Authorship criteria

Seminsky A.K. has written the article and bears the responsibility for plagiarism.

Conflict of interests

The author declares that there is no conflict of interests regarding the publication of this article.

The article was received 24 October 2017