

Оригинальная статья / Original article

УДК 550.835.24+551.24

<http://dx.doi.org/10.21285/2541-9455-2017-40-4-69-76>

ПОЛЕ ЭМАНАЦИЙ РАДОНА И ЗЕМЛЕТРЯСЕНИЯ В ПРИБАЙКАЛЬЕ: ПЕРВЫЙ ОПЫТ ПРИМЕНЕНИЯ ИНФОРМАЦИОННОЙ ЭНТРОПИИ

© А.А. Бобров^а

^аИнститут земной коры СО РАН,

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

РЕЗЮМЕ. Цель. Выявление характера влияния землетрясений на концентрацию радона, которая была зафиксирована в зоне одного из крупнейших разломов Байкальского рифта. **Методы.** Мониторинг активности почвенного радона Q проводился в течение 2010–2016 гг. в зоне крупнейшего Приморского сброса, который располагается в центральной части Байкальского рифта, при помощи прибора РРА-01М-03. Полученные ряды вариаций параметра Q сопоставлялись с сейсмической активностью региона на качественном, а также количественном уровне посредством оценки информационной энтропии S_{inf} . **Результаты.** Временные изменения радоновой активности достигают трех порядков ($31-31247$ Бк/м³) и характеризуются наличием периодических и стохастических составляющих. Установлено, что в радиусе 35 км от станции мониторинга радона все 12 зафиксированных землетрясений с $K > 8,5$ стабильно вызывают локальный минимум на графиках вариаций объемной активности радона, а также значительное понижение информационной энтропии ($S_{inf} < S_{inf\text{ ср}} - \sigma$). Десять из них характеризуются радоновой аномалией в пределах 48 ч до момента сейсмического события, а два события – в пределах 53 ч после землетрясения. Область локализации эпицентров вытянута в северо-восточном направлении согласно простиранию Приморского разлома и Байкальского рифта в целом. Эпицентры на графиках, как правило, связаны с понижением объемной активности радона и значениями энтропии меньше среднего арифметического. **Выводы.** Первый опыт использования информационной энтропии при анализе радоновых данных для центральной части Байкальского рифта показал высокую эффективность параметра S_{inf} . Полученные результаты исследований могут быть использованы для выявления предвестников землетрясений. Дальнейшее изучение характера вариаций информационной энтропии, возможно, позволит в будущем установить закономерности, способствующие эффективному выделению предвестников, что, в свою очередь, приблизит нас к решению вопроса предсказания землетрясений. *Ключевые слова:* разломные зоны, эманационная съемка, радон, сейсмичность.

Формат цитирования: Бобров А.А. Поле эманаций радона и землетрясения в Прибайкалье: первый опыт применения информационной энтропии // Известия Сибирского отделения Секции наук о Земле Российской академии естественных наук. Геология, разведка и разработка месторождений полезных ископаемых. 2017. Т. 40. № 4. С. 69–76. DOI: 10.21285/2541-9455-2017-40-4-69-76

RADON EMANATION FIELD AND EARTHQUAKES IN BAIKAL REGION: FIRST EXPERIENCE IN INFORMATION ENTROPY APPLICATION

A.A. Bobrov

Institute of the Earth's crust SB RAS,

128 Lermontov St., Irkutsk 664033, Russian Federation

ABSTRACT. The **Purpose** of the paper is identification of the nature of earthquake effect on radon concentration recorded in the area of one of the largest faults of the Baikal rift. **Methods.** The activity of soil radon Q has been monitored from 2010 to 2016 in the area of the largest Primorsky fault located in the central part of the Baikal rift using the RRA-01M-03 (automated radon radiometer) device. The resulting series of Q parameter variations were compared with the seismic activity of the region in qualitative and quantitative level via information entropy S_{inf}

^аБобров Александр Анатольевич, кандидат геолого-минералогических наук, научный сотрудник лаборатории тектонофизики, e-mail: alexbob@crust.irk.ru

Aleksandr A. Bobrov, Candidate of Geological and Mineralogical sciences, Researcher of the Tectonophysics Laboratory, e-mail: alexbob@crust.irk.ru

estimation. **Results.** Temporal variations in radon activity reach three orders ($31\text{--}31247\text{ Bq/m}^3$) and are characterized by the presence of periodic and stochastic components. It has been determined that within the radius of 35 km from the radon monitoring station all 12 recorded earthquakes with $K > 8.5$ consistently cause a local minimum on the graphs of radon volumetric activity variations and significantly decrease informational entropy ($S_{inf} < S_{inf\text{ cp}} - \sigma$). Ten of them are characterized by a radon anomaly within 48 hours before the seismic event, and 2 events within 53 hours after the earthquake. The localization of epicenters elongates in a north-easterly direction along the strike of the Primorsky fault and the Baikal rift as a whole. The epicenters on the graphs, as a rule, are associated with the reduction in radon activity concentrations and the entropy values, which are smaller than the arithmetic mean. **Conclusions.** The first experience of using the information entropy in the analysis of radon data for the central part of the Baikal rift has shown the high efficiency of the parameter S_{inf} . The obtained study results can be used for earthquake precursor identification. Further study of the nature of information entropy variations will probably enable to establish the regularities enabling effective identification of precursors, which in its turn will bring us closer to the solution of the problem of predicting earthquakes.

Keywords: fault zones, emanation survey, radon, seismicity

For citation: Bobrov A.A. Radon emanation field and earthquakes in the Baikal region: first experience in information entropy application. 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. 69–76. (In Russian). DOI: 10.21285/2541-9455-2017-40-4-69-76

Введение

Исследование временных вариаций радона может проводиться как для повышения эффективности эманационной съемки, направленной на поиски урановых месторождений в разломных зонах, так и для выявления предвестниковых признаков землетрясений. Мониторинг объемной активности радона Q проводился в центральной части Байкальского рифта в зоне крупнейшего Приморского сброса. Подобные работы для данного региона осуществлялись и ранее [1], но без использования в анализе параметра информационной энтропии S_{inf} . Как показывают исследования предвестников [2–7 и др.], при постоянных (мониторинговых) измерениях в одной и той же точке массива горных пород концентрация радона в почве над активным разломом существенно варьирует во времени, что отражает изменение поля напряжений, например в связи с подготовкой землетрясения.

В работе С.Ц. Акопяна с соавторами [8] приведен подход к прогнозированию землетрясений с использованием энтропии. В статье Q.-X. Zhang с соавторами [9] с помощью информационной энтропии осуществлялось пространственное сканирование областей для поиска

предвестников сейсмических событий. В обоих случаях использование параметра энтропии позволило получить удовлетворительный результат. Сосредоточенность людей в Прибайкалье, а также на сегодняшний день активно развивающаяся туристическая деятельность делает актуальным вопрос поиска предвестниковых признаков землетрясений для тектонически активного Байкальского рифта, развитие которого сопровождается высокой сейсмичностью.

Задача данного исследования заключалась в выявлении характера влияния землетрясений на вариации параметра информационной энтропии, рассчитанной через концентрацию радона.

Методика проведения мониторинговых измерений

Предшествующие исследования радоновой активности разломов Прибайкалья [10, 11] показали, что в разломных зонах существуют «чувствительные» в плане эманаций точки. Они соответствуют высоко нарушенным трещинами участкам разломной зоны, характеризующимся максимальными амплитудами вариаций объемной активности радона. При этом участок, на котором располагается станция мониторинга, должен находиться вблизи главного разломного

смещителя. Местоположение мониторинговой станции радона выбрано с учетом опыта предшествующих исследований: оборудование было установлено вблизи Приморского сброса, являющегося одним из крупнейших разломов Байкальского рифта.

Эманационные мониторинговые исследования проводились при помощи прибора РРА-01М-03, который способен осуществлять замеры в автоматическом режиме с периодичностью 85 мин. Каждая проба сопровождалась записью информации о дате и времени измерения, а также температуре, атмосферном давлении и относительной влажности воздуха. Прибор РРА-01М-03 при определении концентрации радона характеризуется чувствительностью не менее $1,4 \cdot 10^{-4} \text{ с}^{-1} \cdot \text{Бк}^{-1} \cdot \text{м}^3$ и 30%-м пределом допускаемой относительной погрешности. Отбор почвенного воздуха с последующим измерением осуществлялся по модернизированной методике с глубины 1 м. Для этого был пробурен шпур диаметром 4 см, в который помещена обсадочная перфорированная снизу труба для беспрепятственного проникновения воздуха через ее стенки. Для осушения пробы используются гранулы CaCl_2 , помещенные в колбу, которая располагается на пути воздушного потока непосредственно перед радиометром. Согласно паспортным данным прибор должен использоваться только в положительном диапазоне температур, поэтому для круглогодичных измерений был сделан утепленный короб.

Результаты работ и их обсуждение

Мониторинговыми исследованиями радоновой активности в центральной части Байкальского рифта с 2010 по 2016 гг. был получен ряд данных. Вариации параметра имеют скачкообразный характер. Максимальное зафиксированное значение объемной активности радона составило 31247, а минимальное – 31 Бк/м³, то есть вариации радона на мониторинго-

вой станции достигают трех порядков. На рис. 1, а показан пример графика радоновой активности с марта по август 2013 г. Для решения главной задачи исследования полученные данные сравнивались с сейсмичностью Байкальского рифта. Информация о землетрясениях была взята с сайта Байкальского филиала Федерального государственного бюджетного учреждения науки Федерального исследовательского центра «Единой геофизической службы Российской академии наук» (БФ ФИЦ ЕГС РАН, seis-bykl.ru). Было принято решение анализировать только землетрясения с энергетическим классом $K > 8,5$, произошедшие не дальше 100 км от мониторинговой станции радона. Как показал опыт предшествующих исследований, в данном радиусе должно происходить уменьшение концентраций радона [12].

Для решения задачи исследования использовалась информационная энтропия S_{inf} , рассчитываемая по формуле

$$S_{inf} = - \sum_{i=1}^K w_i \cdot \log_2 w_i,$$

где w_i – дискретное распределение вероятностей для K независимых элементарных событий, удовлетворяющих условию

$\sum_{i=1}^K w_i = 1$ [13]. Для подсчета параметра S_{inf}

была составлена программа Monitoring_Rn. Она позволяет с различными выбираемыми пользователем параметрами производить расчет информационной энтропии для попадающих в скользящее «окно» значений, которые составляют ряд измерений Q . Величина «окна» для расчета параметра S_{inf} равнялась 1, 2 и 3 сут. Наиболее информативным является график с «окном» в 1 сут., который и использовался в дальнейшем анализе (см. рис. 1, б). Для выделения аномалий на графике энтропии находилась разница среднеарифметического значения $S_{inf\text{cp}}$ и стандартного отклонения σ . Глубоким минимумом информационной энтропии

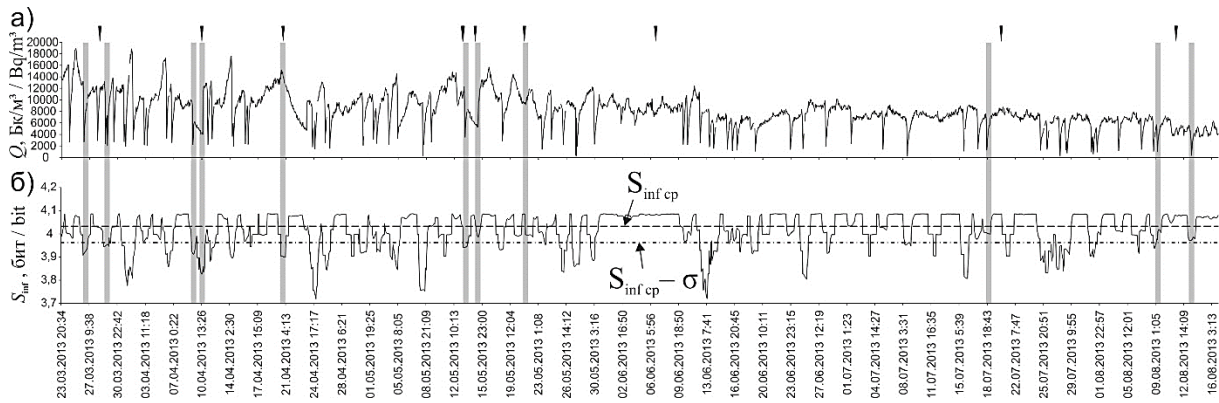


Рис. 1. Фрагмент (март – август 2013 г.) графика вариаций объемной активности радона (а) и информационной энтропии (б), который был получен по данным мониторинга на станции, расположенной в центральной части Байкальского рифта:
 S_{inf} – информационная энтропия, бит; Q – объемная активность радона, Бк/м³
 Серым цветом указаны аномалии параметра Q и соответствующий им локальный минимум энтропии. Треугольниками сверху – землетрясения с $K > 8,5$, находящиеся в радиусе 100 км от мониторинговой станции

Fig. 1. Fragment (March – August 2013) of the graph of radon volumetric activity variation (a) and information entropy (b) obtained according to the data of the monitoring station located in the central part of the Baikal rift:

S_{inf} – information entropy, bit; Q – radon volumetric activity, Bq/m³

Gray color indicates parameter Q anomalies and the local entropy minimum corresponding to them.

Triangles on the top indicate the earthquakes with $K > 8.5$ within the radius of 100 km from the monitoring station

считалась ситуация, когда параметр S_{inf} был меньше величины $S_{inf\ cp} - \sigma$ (см. рис. 1, б, точка с пунктиром).

Сравнение графиков изменения параметров Q и S_{inf} с выборкой из ближайших землетрясений (< 100 км) показало, что, как правило, в течение 2,5 сут. до либо после сейсмического события на графиках наблюдается локальный минимум объемной активности радона, который в преобладающем большинстве случаев сопровождается понижением информационной энтропии (см. рис. 1, серые полосы). В редких случаях сейсмическим событиям соответствуют пики объемной активности радона. Есть землетрясения, которые не вызывали понижение на графике информационной энтропии, например сейсмическое событие, произошедшее 6 июня 2013 г. в 12:24 по Гринвичу. На расстоянии ближе 35 км от станции мониторинга радона все 12 землетрясений с $K > 8,5$ отметились локальным минимумом на графике вариаций объемной активности радона, а также

значительным понижением информационной энтропии ($S_{inf} < S_{inf\ cp} - \sigma$). При этом десять из них характеризуются радоновой аномалией в пределах 48 ч до момента сейсмического события, а два события – в пределах 53 ч после землетрясения. При рассмотрении в плане местоположения эпицентров сейсмических событий, произошедших в пределах 100 км от станции мониторинга радона, видно, что область, в которой землетрясения на графиках, как правило, выделяются понижением объемной активности радона, а значения энтропии становятся меньше среднеарифметического, вытянута в северо-восточном направлении (рис. 2, пунктирная линия), что совпадает с простиранием Приморского сброса и в целом центральной части Байкальского рифта.

На графике объемной активности радона присутствуют локальные минимумы, которые также сопровождаются понижением параметра S_{inf} , но при этом в каталоге БФ ФИЦ ЕГС РАН нет информации о произошедших землетрясениях

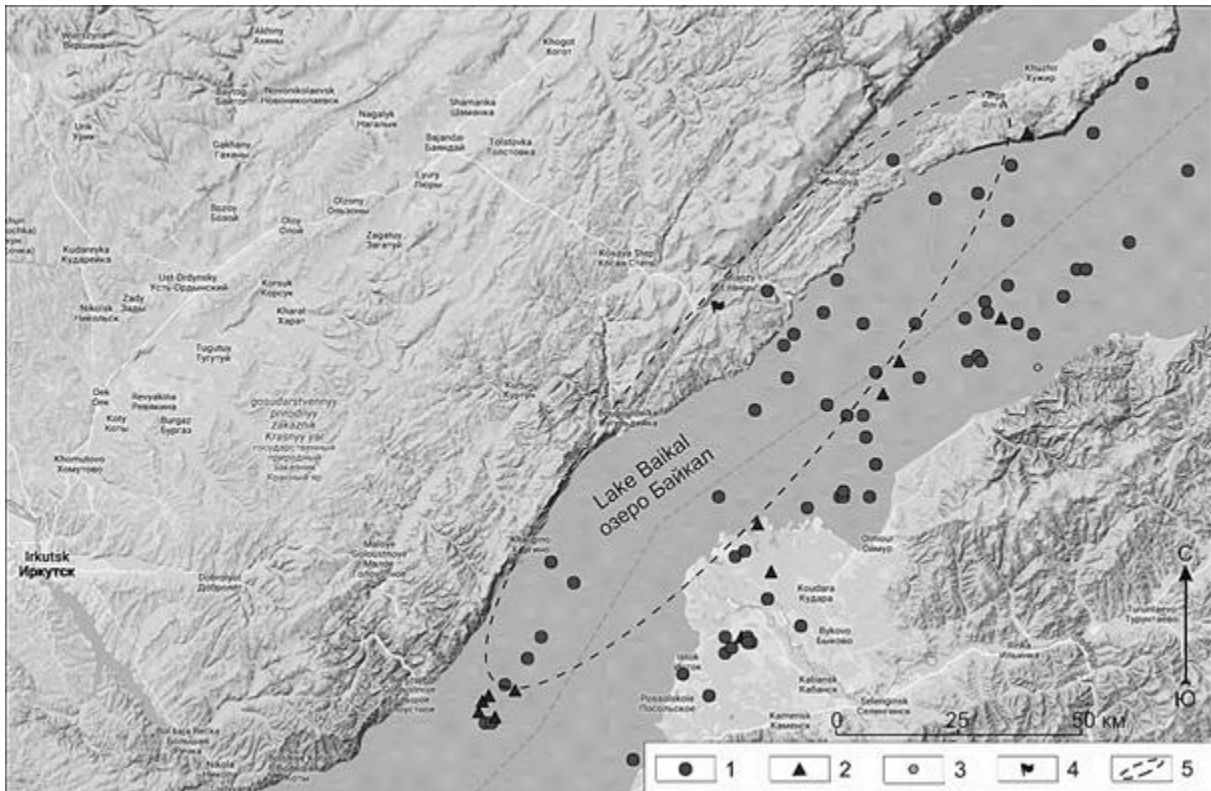


Рис. 2. Схема эпицентров землетрясений, расположенных в пределах 100 км от мониторинговой радоновой станции:
 1 – сейсмические события, отмечающиеся на графике понижением параметра Q при $S_{inf} < S_{inf\ cp}$;
 2 – сейсмические события, отмечающиеся на графике понижением параметра Q при $S_{inf} > S_{inf\ cp}$;
 3 – сейсмическое событие, отмечающееся на графике локальным максимумом радона при $S_{inf} < S_{inf\ cp}$;
 4 – станция мониторинга радона; 5 – область, в которой все сейсмические события вокруг мониторинговой станции характеризуются $S_{inf} < S_{inf\ cp}$ и локальным минимумом параметра Q

Fig. 2. Diagram of earthquake epicenters located within 100 km from the radon monitoring station:
 1 – seismic events indicated on the graph with the decrease of the parameter Q at $S_{inf} < S_{inf\ cp}$;
 2 – seismic events indicated on the graph with the decrease of the parameter Q at $S_{inf} > S_{inf\ cp}$;
 3 – seismic events indicated on the graph with the local maximum of radon at $S_{inf} < S_{inf\ cp}$;
 4 – radon monitoring station; 5 – area where all seismic events around the monitoring station are characterized by $S_{inf} < S_{inf\ cp}$ and the local minimum of the parameter Q

в данные моменты времени. Во-первых, это связано с тем, что в выборке (< 100 км) присутствуют только крупные сейсмические события с энергетическим классом более 8,5. Аномалии на графиках вариаций радона и энтропии могут быть вызваны близкими к станции мониторинга мелкими землетрясениями, которые не включены в каталог БФ ФИЦ ЕГС РАН. Во-вторых, аномалии могут быть обусловлены перераспределением тектонических напряжений в земной коре, которые связаны крупнейшими сейсмиче-

скими событиями, происходящими на больших дистанциях. Так, при катастрофическом землетрясении Тохоку в 2011 г. в Японии расстояние, на котором фиксировались изменения в характере вариаций поля радона на мониторинговой станции в центральной части Байкальского рифта, составило более 3000 км [1].

Выводы

1. Радоновая активность на мониторинговой станции, расположенной в центральной части Байкальского рифта, изменяется от 31 до 31247 Бк/м³. При

проведении эманационной съемки в геодинамически активных регионах, в том числе направленной на поиски урановых месторождений в разломных зонах, необходимо учитывать, что вариации параметра могут достигать трех порядков.

2. В радиусе 35 км от станции мониторинга радона все 12 зафиксированных землетрясения ($K > 8,5$) стабильно вызывают локальный минимум на графике объемной активности радона, а также значительное понижение информационной энтропии ($S_{inf} < S_{inf\ cp} - \sigma$). Десять из них характеризуются радоновой аномалией в пределах 48 ч до момента сейсмического события, а два события – в пределах 53 ч после землетрясения. Таким образом, использование информационной энтропии позволяет повысить эффективность радоновых мониторинговых исследований.

3. Область, в которой землетрясения на графиках, как правило, выделяются понижением объемной активности радона, а значения энтропии становятся

меньше среднеарифметического, имеет вытянутую форму в северо-восточном направлении согласно простиранию Приморского сброса и центральной части Байкальского рифта в целом.

Первый опыт использования информационной энтропии при анализе радоновых данных для центральной части Байкальского рифта показал высокую эффективность параметра S_{inf} . Полученные результаты исследований могут быть использованы для выявления предвестников землетрясений. Дальнейшее изучение характера вариаций информационной энтропии, возможно, позволит в будущем установить закономерности, способствующие эффективному выделению предвестников, что, в свою очередь, приблизит решение вопроса предсказания землетрясений.

Автор благодарен С.А. Борнякову за ценные рекомендации, направленные на повышение эффективности методики обработки эманационных данных.

Библиографический список

1. Семинский К.Ж., Бобров А.А. Первые результаты исследований временных вариаций эманационной активности разломов западного Прибайкалья // Геодинамика и тектонофизика. 2013. Т. 4. № 1. С. 1–12.

2. King C.Y. Radon emanation on San Andreas fault // Nature. 1978. Vol. 271 (5645). P. 516–519.

3. Rikitake T. Biosystem behaviour as an earthquake precursors // Tectonophysics. 1978. Vol. 51 (1-2). P. 1–20.

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

5. Уткин В.И., Мамыров Э., Канн М.В., Кривашеев С.В., Юрков А.К., Косякин И.И., Шишканов А.Н. Мониторинг радона при изучении процесса подготовки

тектонического землетрясения на северном Тянь-Шане // Физика Земли. 2006. № 9. С. 61–70.

6. Cicerone R.D., Ebel J.E., Britton J. A systematic compilation of earthquake precursors // Tectonophysics. 2009. Vol. 476 (3-4). P. 371–396.

7. Ghosh D., Deb A., Sengupta R. Anomalous radon emission as precursor of earthquake // Journal of Applied Geophysics. 2009. Vol. 69 (2). P. 67–81.

8. Акопян С.Ц., Бондур В.Г., Порожин Е.А. Технология мониторинга и прогнозирования сильных землетрясений на территории России с использованием метода сейсмической энтропии // Физика Земли. 2017. № 1. С. 34–53.

9. Zhang Q.-X., Chen Z.-Y., Huang X.-H., Chen Y.-D., Chen C.-C., Lin M.-J. Space scanning features of information entropy of

precursory observation data from Fujian area // *Earthquake*. 2012. Vol. 32 (1). P. 118–127.

10. Семинский К.Ж., Бобров А.А. Радоновая активность разнотипных разломов земной коры (на примере Западного Прибайкалья и Южного Приангарья) // *Геология и геофизика*. 2009. Т. 50. № 8. С. 881–896.

11. Бобров А.А. К вопросу о сейсмической активности и поле радона в Приольхонье (Западное Прибайкалье) //

Известия Сибирского отделения Секции наук о Земле Российской академии естественных наук. Геология, поиски и разведка рудных месторождений. 2016. № 3 (56). С. 76–85.

12. Уткин В.И. Радон и проблема тектонических землетрясений // *Соросовский образовательный журнал*. 2000. Т. 6. № 12. С. 64–70.

13. Шеннон К. Работы по теории информации и кибернетике: сб. стат. М.: Изд-во иностр. лит., 1963. 829 с.

References

1. Seminskii K.Zh., Bobrov A.A. The first results of studies of temporary variations in soilradon activity of faults in Western Pribaikalie. *Geodinamika i tektonofizika* [Geodynamics & Tectonophysics], 2013, vol. 4, no. 1, pp. 1–12. (In Russian).

2. King C.Y. Radon emanation on San Andreas fault. *Nature*, 1978, vol. 271 (5645), pp. 516–519.

3. Rikitake T. Biosystem behaviour as an earthquake precursors. *Tectonophysics*, 1978, vol. 51 (1-2), pp. 1–20.

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

5. Utkin V.I., Mamyrov E., Kann M.V., Krivashev S.V., Yurkov A.K., Kosyakin I.I., Shishkanov A.N. Monitoring radona pri izuchenii protsessa podgotovki tektonicheskogo zemletryaseniya na severnom Tyan'-Shane. *Fizika Zemli* [Izvestiya, Physics of the Solid Earth], 2006, no. 9, pp. 775–785. (In Russian).

6. Cicerone R.D., Ebel J.E., Britton J. A systematic compilation of earthquake precursors. *Tectonophysics*, 2009, vol. 476 (3-4), pp. 371–396.

7. Ghosh D., Deb A., Sengupta R. Anomalous radon emission as precursor of earthquake. *Journal of Applied Geophysics*, 2009, vol. 69 (2), pp. 67–81.

8. Akopyan S.Ts., Bondur V.G.,

Rogozhin E.A. Seismic entropy-based technology for monitoring and forecasting of strong earthquakes in Russia. *Fizika Zemli* [Izvestiya, Physics of the Solid Earth], 2017, no. 1, pp. 34–53. (In Russian).

9. Zhang Q.-X., Chen Z.-Y., Huang X.-H., Chen Y.-D., Chen C.-C., Lin M.-J. Space scanning features of information entropy of precursory observation data from Fujian area. *Earthquake*, 2012, vol. 32 (1), pp. 118–127.

10. Seminskii K.Zh., Bobrov A.A. Radon activity of faults (western Baikal and southern Angara areas). *Geologiya i geofizika* [Russian Geology and Geophysics], 2009, vol. 50, no. 8, pp. 881–896. (In Russian).

11. Bobrov A.A. To seismic activity and radon field in Priolkhonie (Western Baikal region). *Izvestiya Sibirskogo otdeleniya Sektsii nauk o Zemle Rossiiskoi akademii estestvennykh nauk. Geologiya, poiski i razvedka rudnykh mestorozhdenii* [Proceedings of the Siberian Department of the Section of Earth Sciences, Russian Academy of Natural Sciences. Geology, Prospecting and Exploration of Ore Deposits], 2016, no. 3 (56), pp. 76–85. (In Russian).

12. Utkin V.I. Radon and the problem of tectonic earthquakes. *Sorosovskii obrazovatel'nyi zhurnal* [Soros educational journal], 2000, vol. 6, no 12, pp. 64–70. (In Russian).

13. Shannon K. *Raboty po teorii informatsii i kibernetike* [Works on the information theory and cybernetics]. Moscow:

Inostrannaya literature Publ., 1963, 829 p. (In Russian).

Критерии авторства

Authorship criteria

Бобров А.А. написал статью и несет ответственность за плагиат.

Bobrov A.A. has written the article and bears the responsibility for plagiarism.

Конфликт интересов

Conflict of interests

Автор заявляет об отсутствии конфликта интересов.

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

Статья поступила 06.09.2017 г.

The article was received 06 September 2017