ДОКЛАДЫ РОССИЙСКОЙ АКАДЕМИИ НАУК. НАУКИ О ЗЕМЛЕ, 2021, том 499, № 2, с. 159–163

СЕЙСМОЛОГИЯ

УДК 556.043+550.34.06.013.22 (571.55)

ВАРИАЦИИ РАДОНОВОЙ АКТИВНОСТИ В ПОДЗЕМНЫХ ВОДАХ ЮЖНОГО ПРИБАЙКАЛЬЯ: ЭМАНАЦИОННЫЙ ОТКЛИК ЗЕМЛЕТРЯСЕНИЙ

© 2021 г. А. К. Семинский[1,*], К. Ж. Семинский[1]

Представлено академиком РАН В.В. Ярмолюком 14.04.2021 г.
Поступило 15.04.2021 г.
После доработки 28.04.2021 г.
Принято к публикации 30.04.2021 г.

Приведены результаты исследования эманационного отклика на крупные сейсмические события в пределах Байкальского региона за год. В ходе исследования организован мониторинг радиоактивности подземных вод Южного Прибайкалья и выделена совокупность наиболее значимых землетрясений. Рассчитаны радиусы областей влияния произошедших событий и проведена их группировка по пространственному положению относительно пункта опробования. Выявлено три типа эманационных откликов на сейсмические события, один из которых отражает отклик поля не на само событие, а на процесс его подготовки, т.е. является предвестниковым эффектом. Группировка сейсмических событий по удаленности от пункта опробования практически совпадает с группировкой событий по типу отклика. Полученные результаты показывают, что на территории Байкальского региона выявление краткосрочных эманационных предвестников сильных землетрясений возможно при достаточной силе сейсмического события и попадании пункта мониторинга в область его влияния.

Ключевые слова: радон, подземные воды, мониторинг, землетрясения, Южное Прибайкалье

DOI: 10.31857/S2686739721080132

Исследование взаимосвязи сейсмической активности с различными характеристиками окружающей среды является одним из приоритетных научных направлений. Это в первую очередь обусловлено высокой степенью опасности, которую могут представлять землетрясения и их последствия для жизнедеятельности человека, инженерных сооружений и объектов инфраструктуры. Из четырех с половиной сотен научных работ, опубликованных в течение последних десятилетий и направленных на изучение откликов сейсмических событий, около ста пятидесяти базируются на гидрогеологических исследованиях, в том числе более ста посвящены поиску эманационных предвестников сильных землетрясений [1–5]. Повышенное внимание исследователей к объемной активности радона (Q) обусловлено тем, что этот инертный газ, обладая радиоактивными свойствами, легко фиксируется в разных средах. Интенсивность выхода радона напрямую зависит от площади свободной поверхности эманирующих горных пород, которая, в свою очередь, меняется при вариациях напряженного состояния (вследствие раскрытия или закрытия пор, пустот и трещин), обусловленных колебаниями атмосферного давления и степенью геодинамической активности (например, в период наиболее активной стадии подготовки очага).

В пределах Байкальской рифтовой зоны, характеризующейся сложной структурной обстановкой и интенсивной сейсмичностью, исследования пространственно-временных колебаний эманационного поля начаты в 2012 г. На ранних этапах проведены площадная радиометрическая съемка естественных водопроявлений [6] и эманационный мониторинг восьми источников подземных вод, располагающихся на территории Южного Прибайкалья. Целенаправленное изучение взаимосвязи сейсмической активности с колебаниями параметра Q в подземных водах начато на данной территории в 2019 г. [7]. Полученные закономерности базируются на результатах анализа рядов девятилетнего мониторинга с частотой опробования дважды в месяц, а также детальных (ежедневных) наблюдений за параметром Q в одном из источников, входящих в опорную сеть.

[1] *Институт земной коры Сибирского отделения Российской академии наук, Иркутск, Россия*
**E-mail: zzzsancheszzz@gmail.com*

Предварительно установлено, что статистическая связь между исследуемыми параметрами прослеживается слабо, однако, интенсивность землетрясения оказывает умеренное прямое влияние на всплески объемной активности радона, которые наблюдаются с некоторой задержкой во времени после события. Низкий уровень статистической связи, выявленный по предварительным данным, может быть обусловлен двумя главными факторами. Во-первых, сравнительно низкий уровень сейсмической активности в период проведения режимных наблюдений; во-вторых, землетрясения происходят с различной частотой, а их очаги неравномерно распределены в пространстве. В условиях низкой эффективности статистических методов анализа актуальны создание длительных рядов детальных мониторинговых данных и применение выборочного подхода к базе землетрясений, произошедших на исследуемой территории за период эманационного мониторинга.

Целью данной работы было исследовать отклик эманационного поля радона на наиболее сильные землетрясения, произошедшие в пределах Байкальского региона с 01.04.2020 по 12.01.2021, включая три сейсмических события с магнитудой, превышающей 5.5.

Для достижения намеченной цели решались следующие задачи: во-первых, провести продолжительный детальный мониторинг параметра Q в подземных водах исследуемого региона; во-вторых, обосновать выборку наиболее значимых сейсмических событий за период режимных наблюдений и установить пространственное положение их очагов относительно пункта мониторинга; в-третьих, выявить особенности отклика эманационного поля на сильные землетрясения.

Для решения первой задачи из числа источников подземных вод, опробуемых дважды в месяц, был выбран один, обладающий средней, относительно других родников, концентрацией радона. В то же время по абсолютным значениям выбранный источник относится для изучаемой территории к группе аномальных [6], что позволяет наблюдать отчетливые флуктуации параметра Q во времени. Другим фактором, определившим выбор данного источника для детального мониторинга, является его расположение в зоне влияния крупного Ангарского разлома, юго-восточный сегмент которого входит в сеть крупных разрывных структур Байкальского рифта. Отбор проб воды производился один раз в сутки. Измерение параметра Q осуществлялось радиометром РРА-01М-03, характеризующимся пределом погрешности ±30%.

В результате был сформирован массив числовых данных о радиоактивности подземных вод, приуроченных к крупному Ангарскому разлому. Длительность непрерывных наблюдений достигает 300 дней.

Для решения второй задачи из базы сейсмических событий, произошедших в период детальных наблюдений, выбирались землетрясения, способные вызвать значительные колебания эманационного поля. Всего за период ежедневного мониторинга на исследуемой территории произошло 104 сейсмических события с энергетическими классами (K) от 8.8 до 15.7 и магнитудами (M) от 3.2 до 7 соответственно [8]. Магнитуда более 80% событий (84 землетрясения) не превысила 4. Реакция эманационного поля на такие землетрясения, согласно нашим предварительным данным [7], описывается умеренной корреляционной зависимостью и проявляется в виде незначительных пиков объемной активности радона, наблюдаемых во временных рядах примерно через четверо суток после самого события. Таким образом, для углубленного изучения особенностей реакции эманационного поля целесообразно выбрать землетрясения с $M \geq 4$. За десять месяцев мониторинга произошло 20 таких событий. Их эпицентры, за редким исключением, расположены в пределах Байкальской рифтовой зоны и находятся на расстояниях от 65 до 800 км от опробуемого источника подземных вод (рис. 1а).

Важным аспектом исследования является установление радиуса зоны влияния каждого из произошедших землетрясений. К этой зоне относится территория, в пределах которой при подготовке сейсмического события возможна фиксация каких-либо, в т.ч. и эманационных предвестниковых эффектов [9]. В настоящее время существует несколько формул расчета данного параметра. К часто используемым относятся:

$$R = 10^{0.43M} \text{ [10]}; \quad (1)$$

$$R = 10^{(M+0.43)/2.4} \text{ [11]}; \quad (2)$$

$$R = 10^{0.38M+0.33} \text{ [12]}; \quad (3)$$

$$R = 10^{0.5M-0.27} \text{ [13]}, \quad (4)$$

согласно которым магнитуда произошедшего события (M) является частью степенного показателя десятикилометрового радиуса (R) области влияния. Использование представленных формул позволило установить, что пункт мониторинга радона находился в пределах радиуса влияния четырех сейсмических событий; одно событие зафиксировано на расстоянии $1.5R$. Еще три землетрясения произошли на дистанции, равной $1.5 < R \leq 3$ от опробуемого источника. Расстояние до эпицентров оставшихся двенадцати событий более чем в три раза превысило величину расчетного радиуса влияния. Таким образом, рассматриваемую выборку можно считать презентативной для исследования того влияния, которое оказы-

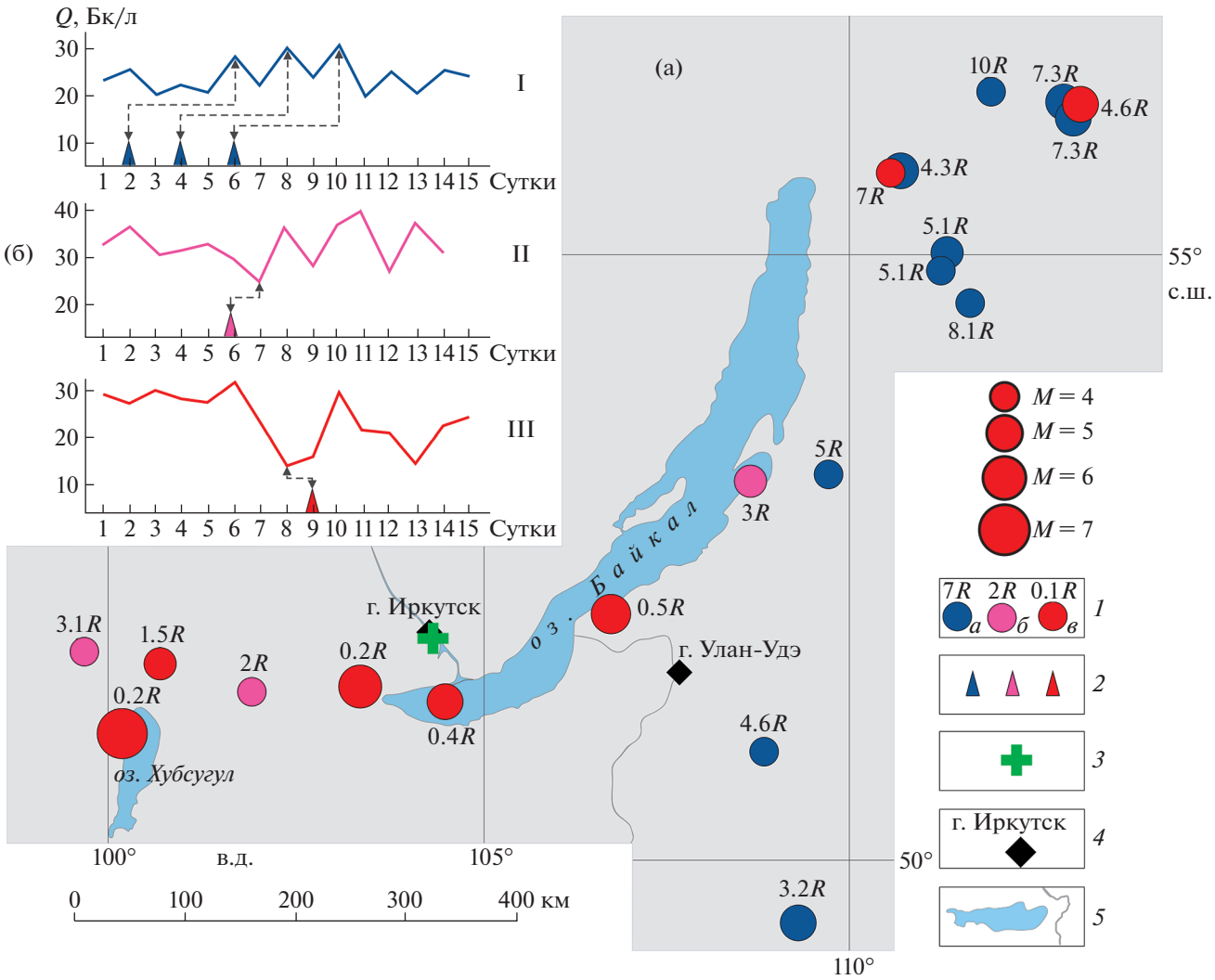

Рис. 1. а – схема расположения очагов сейсмических событий относительно опорного пункта ежедневного опробования; б – примеры типов реакции поля радона на наиболее значимые землетрясения в пределах Байкальского региона. *1* – очаги изученных сейсмических событий, индексы которых обозначают расстояние от пункта мониторинга до эпицентра землетрясения в радиусах области его влияния (цветом показан тип реакции, зафиксированный в пункте мониторинга: а – реакция первого типа, б – реакция второго типа, в – реакция третьего типа); *2* – момент сейсмических событий на графиках вариаций параметра Q; *3* – пункт ежедневного мониторинга Q; *4* – крупные населенные пункты; *5* – гидросеть.

вают степень удаленности и магнитуда землетрясения на характер эманационного отклика.

Решение третьей задачи заключалось в выявлении и типизации откликов радонового поля на наиболее значимые землетрясения. Анализ графика колебаний объемной активности радона позволил выявить три основных типа эманационных откликов, отличающихся характером и амплитудой флуктуации, а также моментом ее проявления относительно момента землетрясения.

Первый из выявленных типов (рис. 1б – I) характеризуется незначительными всплесками на графике параметра Q с запаздыванием в пределах четырех суток после землетрясения, т.е. демонстрирует полную сходимость с реакцией на сейсмические события с $M < 4$, которые, как менее значимые, не вошли в анализируемую выборку. Подобный отклик зафиксирован при десяти землетрясениях, очаги которых располагались в северо-восточном сегменте Байкальской рифтовой зоны или находились на значительном удалении (200–300 км) от ее оси.

Второй тип реакции радонового поля отмечается в пределах первых суток после сейсмического события в виде снижения объемной активности радона на 15–20%, относительно среднего уровня для данного сезона года, с последующим кратковременным всплеском эманирования

(рис. 1б – II). Отклик второго типа был отмечен после трех землетрясений, очаги которых расположены в осевой части Байкальского рифта.

Третий тип эманационного отклика, проявляющийся в виде снижения объемной активности радона, фиксируется за сутки перед самим землетрясением, т.е. отражает реакцию поля не на само событие, а на процесс его подготовки (рис. 1б – III). Подобный предвестниковый эффект был отмечен перед семью землетрясениями. В их число вошли самые сильные на исследуемой территории за последние 10 лет [8] Быстринское (21.09.2020), Кударинское (09.12.2020) и Хубсугульское (11.01.2021) землетрясения, магнитуды которых составили 5.9; 5.5 и 6.7 соответственно.

Важно отметить, что группировка сейсмических событий по удаленности от пункта опробования – относительно радиусов их влияния, – за редким исключением, совпадает с группировкой событий по типу самого отклика и времени его фиксации (рис. 1а). Так, эпицентры землетрясений, вызвавших отклик первого типа, располагались на расстоянии $>3R$ от опорного водоисточника. Эта дистанция для событий с откликом второго типа находилась в пределах $1.5 \leq R \leq 3$. Реакция эманационного поля третьего типа была отчетливо зафиксирована при подготовке сейсмических событий, для которых радиус влияния покрывал опробуемый водоисточник.

Исключение составили два сейсмических события, произошедших на значительном удалении от пункта мониторинга: $7R$ – 29.12.2020 с $M = 4.3$; $4.6R$ – 31.12.2020 с $M = 4.9$. Согласно полученным закономерностям, они должны вызывать в опробуемом источнике реакцию первого типа, однако, перед этими событиями были зафиксированы отчетливые аномалии предвестникового характера. Подобные колебания эманационного поля могут быть вызваны рядом причин, установление которых требует дополнительных, целенаправленных исследований. Одним из вероятных факторов, вызвавших нехарактерную реакцию радонового поля, является влияние сейсмических событий, произошедших далеко за пределами Байкальского региона. В качестве таковых могут, например, рассматриваться два достаточно сильных землетрясения в Чили ($M = 6.8$) и Хорватии ($M = 5.2$). Подобные эффекты ранее фиксировались в Байкальском регионе при изучении временных вариаций параметра Q в почвах [14].

В ходе исследования получены следующие основные результаты.

1. На основе детального мониторинга создан массив числовых данных о радиоактивности подземных вод, приуроченных к активному в плане миграции флюидов и газов сегменту крупного Ангарского разлома. Продолжительность режимных наблюдений достигает 300 дней.

2. Из числа произошедших за время детального мониторинга сейсмических событий выбраны 20 наиболее значимых землетрясений ($M \geq 4$), для которых по известным формулам рассчитаны радиусы областей влияния. Установлено, что в пяти случаях пункт опробования входил в эту область или располагался от нее в непосредственной близости, в трех случаях фактическое расстояние от пункта опробования до эпицентра в полтора-три раза превышало расчетный радиус, в двенадцати оставшихся случаях это расстояние было превышено более чем в три раза. Созданная выборка является презентативной для исследования взаимосвязи пространственного положения эпицентра землетрясения и его магнитуды с характером эманационного отклика.

3. Установлено, что большинство сейсмических событий, произошедших в пределах Байкальской рифтовой зоны и на сопредельных территориях, вызывает заметные колебания эманационного поля. По флуктуациям объемной активности радона выявлено три типа эманационного отклика на сейсмические события, один из которых может быть зафиксирован перед землетрясением, т.е. может рассматриваться как прогностический признак. Необходимо отметить, что в число событий, демонстрирующих такие эффекты, вошли наиболее сильные землетрясения, произошедшие на территории исследования за последние 10 лет – Быстринское, Кударинское и Хубсугульское. Группировка сейсмических событий по удаленности от пункта опробования (с исчислением в радиусах влияния) практически совпадает с группировкой событий по времени их фиксации и типу самого отклика. Таким образом, флуктуации поля радона распространяются от области подготовки землетрясения на значительные расстояния с постепенным затуханием, а момент фиксации эманационного отклика и вид проявившейся на графике аномалии напрямую зависят от мощности готовящегося события, а также расстояния между эпицентром землетрясения и пунктом мониторинга.

Согласно полученным результатам, выявление краткосрочных эманационных предвестников сильных землетрясений на территории Байкальского региона возможно при соблюдении двух главных условий: первое – достаточная сила сейсмического события; второе – расположение пункта мониторинга в пределах области влияния готовящегося землетрясения.

ИСТОЧНИКИ ФИНАНСИРОВАНИЯ

Исследование выполнено в рамках государственного задания “Современная геодинамика, механизмы деструкции литосферы и опасные геологические процессы в Центральной Азии” № FWEF-2021-0009, при частичной поддержке Минобрнауки РФ (в рамках го-

сударственного задания № 075-01304-20) с использованием данных, полученных на установке “Сейсмоинфразвуковой комплекс мониторинга арктической криолитозоны и комплекс непрерывного сейсмического мониторинга Российской Федерации, сопредельных территорий и мира”.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. *Kuo T.* Correlating Precursory Declines in Groundwater Radon with Earthquake Magnitude // Groundwater. 2014. V. 52. № 2. P. 217–224.
2. *Virk H.S.* A Critique of Empirical Scaling Relationship between Earthquake Magnitude, Epicentral Distance and Precursor Time for Interpretation of Radon Data // J. Earthquake Prediction. Res. 1996. V. 5. P. 547–583.
3. *Fleischer R.L., Mogro-Campero A.* Association of Subsurface Radon Changes in Alaska and the Northeastern United States with Earthquakes // Geochim. Cosmochim. Acta. 1985. V. 49. P. 1061–1071.
4. *Fleischer R.L.* Dislocation Model for Radon Response to Distant Earthquakes // Geophys. Res. Lett. 1981. V. 8. P. 477–480.
5. *Woith H.* Radon Earthquake Precursor: A Short Review // Eur. Phys. J. Spec. Top. 2015. V. 224. P. 611–627. https://doi.org/10.1140/epjst/e2015-02395-9
6. *Seminsky K.Zh., Seminsky A.K.* Radon Concentration in Groundwater Sources of the Baikal Region (East Siberia, Russia) // Applied Geochemistry. 2019. V. 111. P. 1–10. https://doi.org/10.1016/j.apgeochem.2019.104446
7. *Семинский А.К., Семинский К.Ж.* Предварительные результаты исследования взаимосвязи сейсмической активности с концентрацией радона в подземных водах Южного Приангарья // Известия Иркутского государственного университета. Серия Науки о Земле. 2020. Т. 33. С. 100–111. https://doi.org/10.26516/2073-3402.2020.33.100
8. Байкальский филиал геофизической службы. 2018. http://seis-bykl.ru/. Заглавие с экрана.
9. *Hirok C., Waseem B., Naseer I., Rakaesh K., Debasis G., Prasanta S., Bikash S.* Long Range Gas-geochemical Anomalies of a Remote Earthquake Recorded Simultaneously at Distant Monitoring Stations in India // Geochemical Journal. 2011. V. 45. P. 137–156.
10. *Dobrovolsky I.P., Zubkov S.I., Miachkin V.I.* Estimation of the Size of Earthquake Preparation Zones // Pure Appl. Geophys. 1979. V. 117. P. 1025–1044.
11. *Hauksson E.* Radon Content of Groundwater as an Earthquake Precursor: Evaluation of Worldwide Data and Physical Basis // J. Geophys. Res. 1981. V. 86. P. 9397–9410.
12. *Rikitake T.* Earthquake Prediction: An Empirical Approach // Tectonophysics. 1988. V. 148. P. 195–210.
13. *Morgounov V.A., Malzev S.A.* A Multiple Fracture Model of Pre-seismic Electromagnetic Phenomena // Tectonophysics. 2007. V. 431. P. 61–72.
14. *Seminsky K.Zh., Bobrov A.A.* The First Results of Studies of Temporary Variations in Soil–radon Activity of Faults in Western Pribaikalie // Geodynamics & Tectonophysics. 2013. V. 4 (1). P. 1–12. https://doi.org/10.5800/GT–2013–4–1–0088

VARIATIONS OF RADON ACTIVITY IN THE GROUNDWATER OF THE SOUTHERN BAIKAL REGION: EMANATION RESPONSE OF EARTHQUAKES

A. K. Seminsky[a, #] and K. Zh. Seminsky[a]

[a] *Institute of the Earth’s Crust, Siberian Branch of the Russian Academy of Sciences, Irkutsk, Russian Federation*

[#] *E-mail: zzzsancheszzz@gmail.com*

Presented by Academician of the RAS V.V. Yarmolyuk April 14, 2021

The paper presents the results of a study of the emanation response to large seismic events within the Baikal region for a year. In the course of the study, monitoring of the radioactivity of underground waters in the Southern Baikal region was organized and a set of the most significant earthquakes was identified. The radii of the areas of influence of the events that occurred were calculated and their grouping was carried out according to their spatial position relative to the sampling point. Three types of emanation responses to seismic events have been identified, one of which reflects the field response not to the event itself, but to the process of its preparation, that is, it is a precursor effect. The grouping of seismic events by distance from the sampling point practically coincides with the grouping of events by the type of response. The results obtained show that the identification of short-term emanation precursors of strong earthquakes on the territory of the Baikal region is possible if the seismic event is strong enough and the monitoring point falls into the area of its influence.

Keywords: radon, groundwater, monitoring, earthquakes, South Baikal region