



<http://dx.doi.org/10.5800/GT-2013-4-1-0088>

THE FIRST RESULTS OF STUDIES OF TEMPORARY VARIATIONS IN SOIL-RADON ACTIVITY OF FAULTS IN WESTERN PRIBAIKALIE

K. Zh. Seminsky, A. A. Bobrov

Institute of the Earth's Crust, SB RAS, Irkutsk, Russia

Abstract: Radon concentrations in soil air are variable depending on factors that are considered external (planetary) and internal (geodynamic) relative to the Earth. In active fault zones, variations of gas emanations are most intense. A permanent monitoring station was established near Tyrgan settlement in Western Pribaikalie to study temporal variations of soil radon concentration, Q , in the faults of the Baikal rift, East Siberia. This station is located in the zone of the Primorsky normal fault that is the largest in the region. The station is equipped with radon radiometer PPA-01M-03 that records Q values every 85 minutes and also monitors a number of meteorological parameters, including atmospheric pressure, humidity, and air temperature.

We analysed records of two measurement sessions (148 and 66 days) covering a part of the year during which field measurement of Q are possible in the cold climate conditions of the area under study. According to the available monitoring data, variations of radon concentrations in the Primorsky fault zone may vary by more than one order of magnitude through a spring-summer-autumn period, and such variations are oscillatory. Significant changes of permeability in time occur due to intensive changes in the state of stresses of the rock massives under the impacts of the planetary and geodynamic factors. The influence of the first group of factors, i.e. planetary ones, is manifested by synchronous oscillations of radon concentrations and atmospheric pressure, which phases of occurrence are opposed. Domination of daily and four-day periods gives evidence that the state of stresses of the rock massives is impacted by the lunar tides and cyclonic phenomena associated with the interaction between the Earth and the Sun. The influence of the second group of factors, i.e. geodynamic ones, is suggested by an evident relation between radon emanations and seismic events, including the catastrophic earthquake in Japan (March 11, 2011, $M=9.0$).

The external and internal factors are acting together, but their roles are different with regard to variations of radon concentrations in different periods of time. In the monitoring periods, radon emanation variations were mainly controlled by the planetary factors. Radon exhalation increases and decreases according to periodic variations in atmospheric pressure, which, in addition to 'pumping' effects, may lead to opening/closure of pores and cracks in the rocks. While external pressures are reduced, internal stresses are released by relatively weak earthquakes. The guiding influence of atmospheric pressure on the yield of radon is disturbed when internal stresses are in excess of a certain level due to intensive movements along faults in the Baikal rift or displacements of plates in neighbouring active zones (for example, due to the strongest earthquake in Japan). In such relatively short periods of time, when seismic activity is increased, the influence of tectonic stresses on permeability of rocks and radon emanations becomes dominant.

Based on our analysis of the measurements of soil radon concentrations obtained on the local site in the Primorsky fault zone through the monitoring period, it became possible, for the first time for Pribaikalie, to reveal and theoretically model the principal specific features of variation of soil radon concentrations, Q , in time and the dependence of such variations on the external and internal factors. Prospects of these studies are related to installation of a network of monitoring stations in the territory of the Baikal rift and assurance of long-term monitoring sessions.

Key words: radon, monitoring, faults, Baikal rift.

Recommended by V.V. Ruzhich

Citation: Seminsky K.Zh., Bobrov A.A. 2013. The first results of studies of temporary variations in soil-radon activity of faults in Western Pribaikalie. *Geodynamics & Tectonophysics* 4 (1), 1–12. doi:10.5800/GT-2013-4-1-0088.

ПЕРВЫЕ РЕЗУЛЬТАТЫ ИССЛЕДОВАНИЙ ВРЕМЕННЫХ ВАРИАЦИЙ ЭМАНАЦИОННОЙ АКТИВНОСТИ РАЗЛОМОВ ЗАПАДНОГО ПРИБАЙКАЛЬЯ

К. Ж. Семинский, А. А. Бобров

Институт земной коры СО РАН, Иркутск, Россия

Аннотация: Концентрация радона в почвенном воздухе варьируется в зависимости от внешних (планетарных) и внутренних (геодинамических) по отношению к Земле факторов, причем в зонах активных разломов газовые эманации меняются наиболее интенсивно. Для оценки характера временных вариаций объемной активности подпочвенного радона (Q) в разломах Байкальского рифта была организована постоянно действующая мониторинговая станция в окрестностях пос. Тырган (Западное Прибайкалье). Она принадлежит к зоне крупнейшего Приморского сброса и оборудована радиометром радона РРА-01М-03, который позволяет каждые 85 мин фиксировать величину Q , а также серию метеопараметров (атмосферное давление, влажность, температура воздуха).

Материалом для анализа послужили результаты двух измерительных сессий продолжительностью 148 и 66 суток, которые охватили ту часть года, в течение которой в условиях холодного климата Восточной Сибири возможны полевые измерения параметра Q . Судя по данным мониторинга, вариации объемной активности радона в зоне Приморского сброса в течение периода весна-лето-осень могут составлять более одного порядка данной величины и являются колебательными по типу. Существенное изменение проницаемости во времени обусловлено интенсивными изменениями напряженного состояния горного массива под воздействием планетарных и геодинамических факторов. Влияние первой группы факторов выражается в синхронных колебаниях объемной активности радона и атмосферного давления, которые происходят в противофазе. Преобладание суточных и четырехсуточных периодов свидетельствует, что на напряженном состоянии горного массива сказываются лунные приливы и циклонические явления, связанные с взаимодействием Земля-Солнце. Влияние второй группы факторов выражается в отчетливой связи эманаций радона с проявлениями сейсмической активности, в т.ч. и с катастрофическим землетрясением в Японии (11.03.2011 г.; $M=9.0$).

Внешние и внутренние факторы действуют совместно, но их роль в вариациях объемной активности радона различна в отдельные отрезки времени. Большую часть периода наблюдений выход радона контролируют планетарные факторы. Эксхалиция усиливается и уменьшается в соответствии с периодическими колебаниями атмосферного давления, которые, кроме «насосного эффекта», могут приводить к раскрытию или закрытию пор и трещин в горных породах. При этом в периоды уменьшения внешнего давления происходит частичная разрядка внутренних напряжений посредством сравнительно слабых землетрясений. Руководящее воздействие атмосферного давления на выход радона нарушается, когда в результате интенсивных движений по разломам в Байкальском рифте или резких подвижек плит в смежных активных зонах (например, в связи с сильнейшим землетрясением в Японии) внутренние напряжения превышают определенный уровень. В эти сравнительно короткие периоды времени, отличающиеся повышением сейсмической активности, влияние тектонических напряжений на проницаемость и выход радона становится определяющим.

Таким образом, анализ мониторинговых измерений объемной активности подпочвенного радона на примере локального участка в зоне Приморского сброса позволил впервые для Прибайкалья выявить и отразить в рамках теоретической модели принципиальные особенности вариаций параметра Q во времени и их зависимость от внешних и внутренних факторов. Перспективы этих исследований связаны с созданием сети мониторинговых станций на территории Байкальского рифта и получением более длинных рядов наблюдений.

Ключевые слова: радон, мониторинг, разломы, Байкальский рифт.

1. ВВЕДЕНИЕ

Западное Прибайкалье является территорией активного природопользования, на которой располагается множество баз отдыха, пансионатов и кемпингов, ежегодно посещаемых десятками тысяч туристов. Главным тектоническим элементом региона является сутура, отделяющая Сибирскую платформу от Саяно-Байкальского складчатого пояса. Древняя граница несколько раз была активизирована в ходе геологической истории. В позднем кайнозое здесь начал формиро-

ваться Байкальский рифт, разделяя таким образом Сибирский и Забайкальский блоки литосферы (рис. 1). В настоящее время продолжается образование глубоких впадин (в т.ч. оз. Байкал), а также активные перемещения по разломам, сопровождающиеся интенсивной сейсмичностью [Logachev, Florensov, 1977; Sherman, 1977; Petit et al., 1996; Levi et al., 1997; Ruzhich, 1997; Delvaux et al., 1997; Mel'nikova, Radziminovich, 1998; Mats et al., 2001; Logachev, 2003].

Несмотря на сосредоточенность людей в Прибайкалье и существование режима растяжения земной коры,

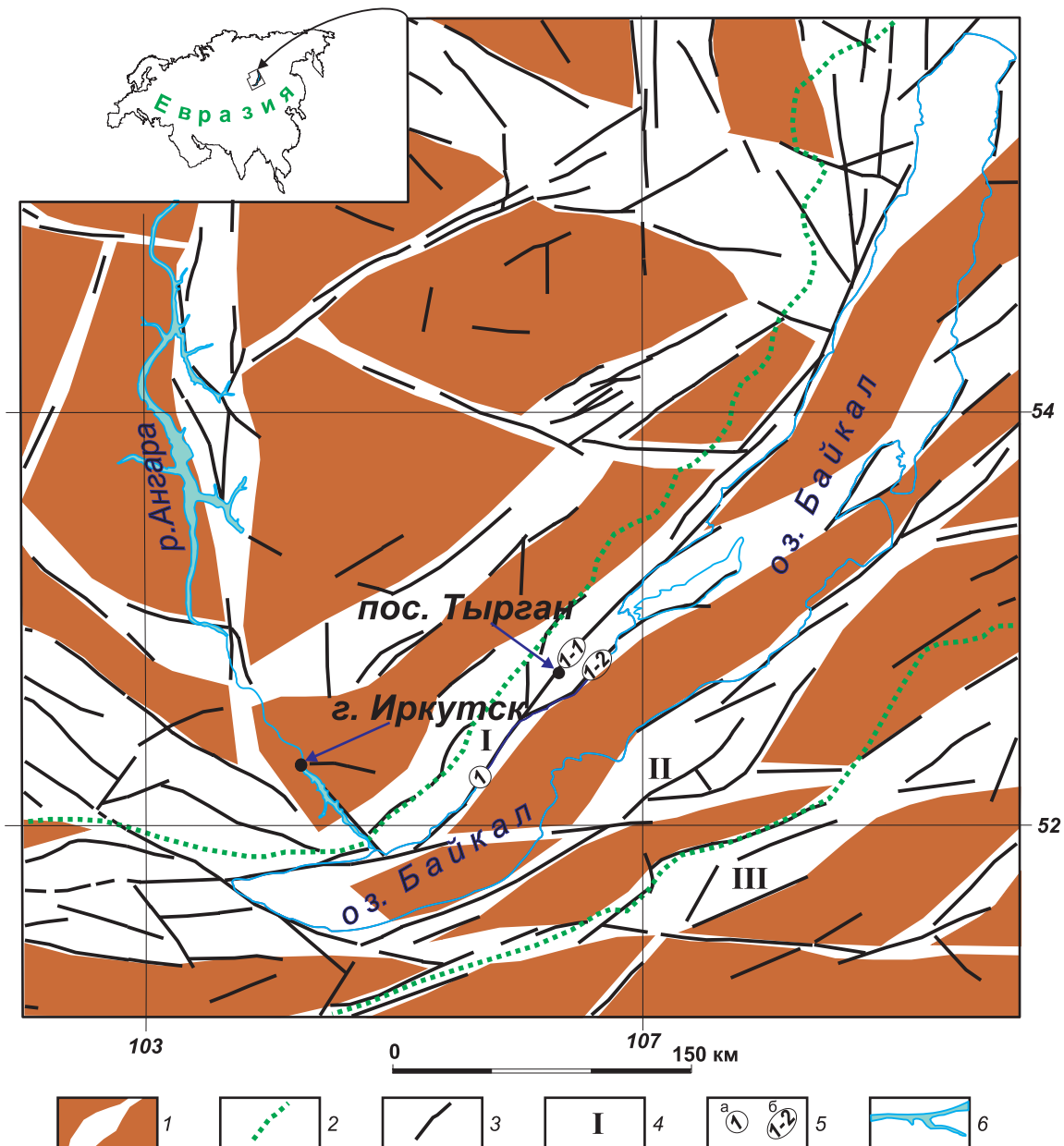


Рис. 1. Схема главных разломов земной коры Прибайкалья. 1 – межблоковые зоны, выделяющиеся повышенной плотностью разломов; 2 – границы Байкальского рифта по [Zolotarev, Khrenov, 1979]; 3 – разломы, выраженные в рельефе уступами и спрямленными элементами речных долин; 4 – индексы разломных систем растяжения: I – Обручевской, II – Черско-Баргузинской, III – Джида-Витимской; 5 – индексы главных разломов Обручевской системы: 1 – Обручевский, 1-1 – Приморский, 1-2 – Морской; 6 – гидросеть.

Fig. 1. The scheme of major crustal faults in Pribaikalie. 1 – inter-block zones with higher density of faults; 2 – boundaries of the Baikal rift [Zolotarev, Khrenov, 1979]; 3 – faults manifested in the topography as benches and straightened elements of river valleys; 4 – indices of extension fault systems: I – Obruchev, II – Chersko-Barguzin, III – Dzhida-Vitim; 5 – indices of the Obruchev fault system: 1 – Obruchevskiy, 1-1 – Primorsky, 1-2 – Morskoj; 6 – drainage system.

способствующего выходу природных газов [Kemski et al., 1996; Atallah et al., 2001; Ioannides et al., 2003; Al-Bataina et al., 2005; Angelone et al., 2005; Tansi et al., 2005; Font et al., 2008; Koike et al., 2009; Richon et al., 2010], эта территория недостаточно изучена в отношении радоновой опасности. Известны статьи Б.П. Черныго с соавторами [Chernyago et al., 2008, 2012], в первой из которых показано, что в домах некоторых населенных пунктов Западного Прибайкалья средние ве-

личины объемной активности почвенного радона (Q) достигают сотен Бк/м³ и пропорциональны концентрациям этого газа в почвенном воздухе. Главным выводом второй публикации является констатация наличия на рассматриваемой территории (и особенно в Приольхонье) участков распространения пород с повышенным содержанием урана, в пределах которых особой опасностью в плане эманаций радона отличаются разломы земной коры.

Первые оценки параметра Q , связанные с несколькими крупными разломами Байкальского рифта, были опубликованы П.В. Ковалем с соавторами [Koval et al., 2006]. Наши предыдущие исследования [Seminsky, Bobrov, 2009a, 2009b, 2012] подтвердили эти результаты, а также выявили зависимость радоновой активности разломов Прибайкалья от их масштабного ранга, типа и степени тектонической активности. Вместе с тем, как показывают исследования предшественников [King, 1978; Rikitake, 1978; Zubkov, 1981; Voitov, 1998; Toutain, Baubron, 1999; Utkin et al., 2006; Cicerone et al., 2009; Ghosh et al., 2009], при постоянных (мониторинговых) измерениях в одной и той же точке массива горных пород концентрация радона в почве над активным разломом существенно варьируется во времени, что отражает изменение поля напряжений, например, в связи с подготовкой землетрясения. В центральной части Байкальского рифта работы по мониторингу радона из разломных зон земной коры ранее не проводились.

Таким образом, задача данного исследования заключалась в исследовании специфики временных вариаций объемной активности почвенного радона на основе анализа мониторинговых измерений эманационных и метеопараметров в зоне одного из крупных разломов центральной части Байкальского рифта.

2. МЕТОДИКА ПРОВЕДЕНИЯ МОНИТОРИНГОВЫХ ИЗМЕРЕНИЙ ОБЪЕМНОЙ АКТИВНОСТИ ПОЧВЕННОГО РАДОНА И ОСОБЕННОСТИ ОБРАБОТКИ ПОЛУЧЕННЫХ МАТЕРИАЛОВ

Согласно данным предыдущих исследований радоновой активности разломов Прибайкалья [Seminsky, Bobrov, 2009a, 2009b], «чувствительным» точкам (с максимальными амплитудами Q) в плане эманаций соответствуют высоконарушенные трещинами участки тектонически активных разломных зон. На территории Западного Прибайкалья одним из них является зона Приморского разлома, представляющая одну из ветвей Обручевского сброса – главного рифтообразующего дизъюнктива на западном плече Байкальского рифта. Приморский сброс выделяется в виде эманационной аномалии, объемная активность которой достигает нескольких десятков тысяч Бк/м³ [Seminsky et al., 2012], т.е. величин, максимальных для территории Приольхонья.

В структурном отношении зона Приморского разлома выражена Бугульдейско-Чернорудским грабеном [Mats et al., 2001] с бортовыми сбросами: собственно Приморским и Тырган-Кучелгинским. В пределах грабена и его окрестностей, согласно результатам структурно-геологических, электроразведочных и рекогносцировочных эманационных исследований [Seminsky et al., 2012], зафиксировано высокое в целом содержание почвенного радона и низкое кажущееся удельное элек-

трическое сопротивление, что обусловлено высокой степенью нарушенности пород в отличие от окружающих массивов. В то же время внутри зоны выявлены менее и более трещиноватые и выветрелые участки горных пород, что подтверждают данные бурения в локальных точках рассматриваемой территории [Dombrovskaya, 1973]. Последние (в т.ч. места локализации собственно Приморского и Тырган-Кучелгинского разломов) слабопроницаемы для газов из-за интенсивного выветривания.

Вследствие полученных данных станция мониторинга «Тырган» была организована висячем крыле активного Тырган-Кучелгинского разлома (рис. 1). На этом участке интенсивно трещиноватый массив мраморов характеризуется относительно слабой степенью выветривания и сравнительно высокими значениями объемной активности радона – 10000–12000 Бк/м³. Полученные впоследствии ряды мониторинговых измерений показали, что величина параметра Q варьируется в месте отбора проб от 5000 до 16000 Бк/м³. Таким образом, данная точка действительно является «чувствительной» к изменению эманационного поля, что необходимо для выявления главных закономерностей изменения объемной активности радона во времени.

Инструментальную основу мониторинговой станции «Тырган» составил прибор PPA-01M-03, который в автоматическом режиме с периодичностью 85 мин закачивал почвенный воздух с глубины 1 м, производил замеры и сохранял в памяти информацию о времени измерения, объемной активности почвенного радона, а также атмосферном давлении, относительной влажности и температуре надпочвенного воздуха. PPA-01M-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%-ным пределом допускаемой относительной погрешности. Кроме методических наблюдений, были проведены две сессии измерений, продолжительностью 148 и 66 суток, которые охватили ту часть года, в течение которой в условиях холодного климата Восточной Сибири возможны полевые измерения параметра Q (рис. 2, 3). Таким образом, на примере Тырган-Кучелгинского сброса получены материалы, позволяющие впервые изучить временные особенности эманаций радона из разломов центральной части Байкальского рифта.

Жирными линиями на графиках показаны трендовые изменения параметров. Красными стрелками отмечены моменты землетрясений с $M \geq 2.8$. Розовые полосы маркируют периоды времени, которым соответствуют частные минимумы атмосферного давления и максимумы объемной активности радона.

Спецификой обработки мониторинговых данных, полученных на станции «Тырган», явилось построение трендовых кривых с использованием окна осреднения, равного 24 часам (рис. 2, 3). Это позволило уменьшить негативное влияние пробелов в рядах данных, связанных с необходимостью проведения профилактическо-

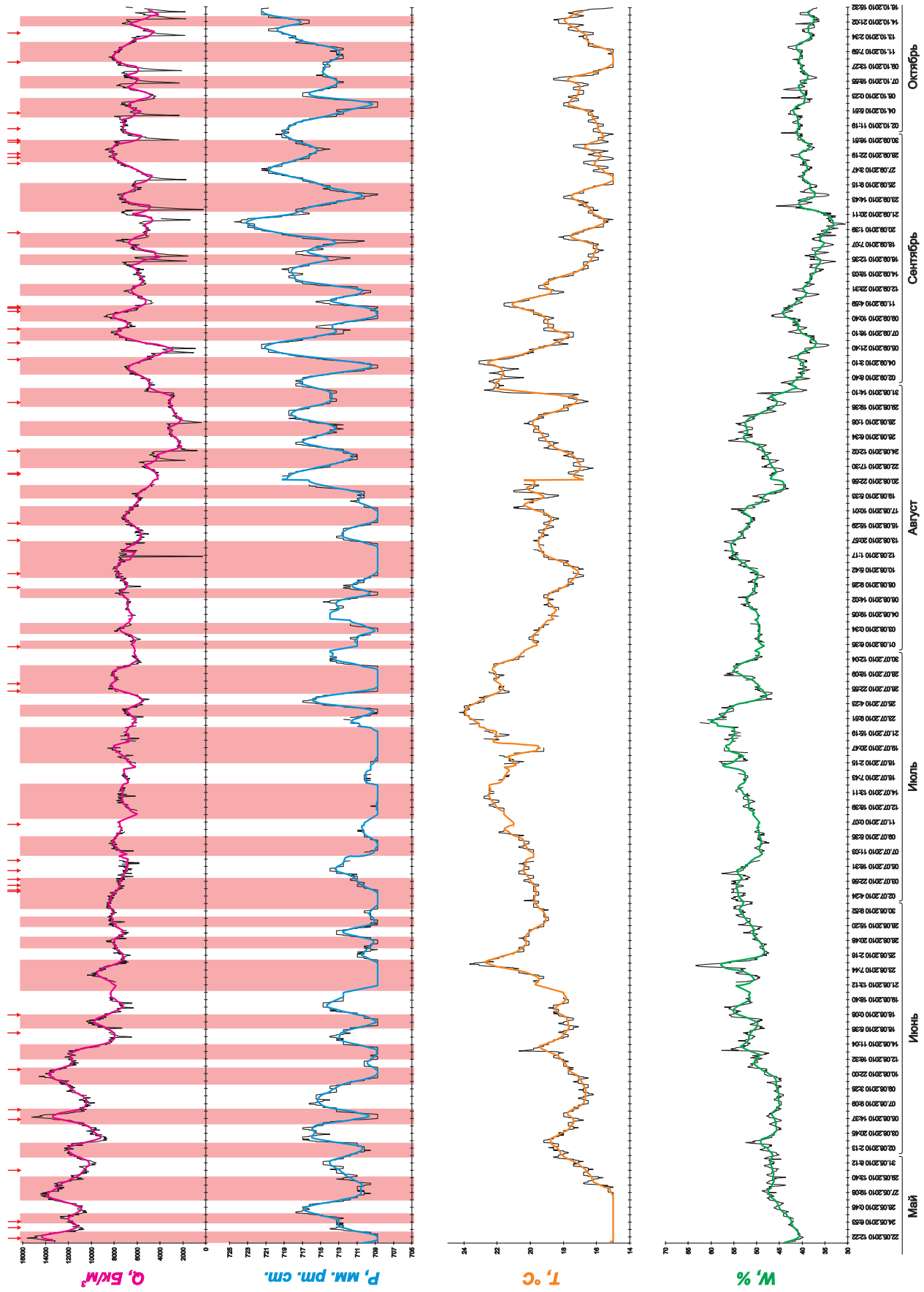


Рис. 2. Графики временных вариаций объемной активности радона (Q), атмосферного давления (P), температуры (T) и относительной влажности (W) воздуха, полученные по данным мониторинга на станции «Гырган» с мая по октябрь 2010 г.

Fig. 2. Curves of temporal variations of radon activity concentration (Q), atmospheric pressure (P), temperature (T), and relative air humidity (W), according to monitoring data recorded at the Gurgan Station from May to October 2010.

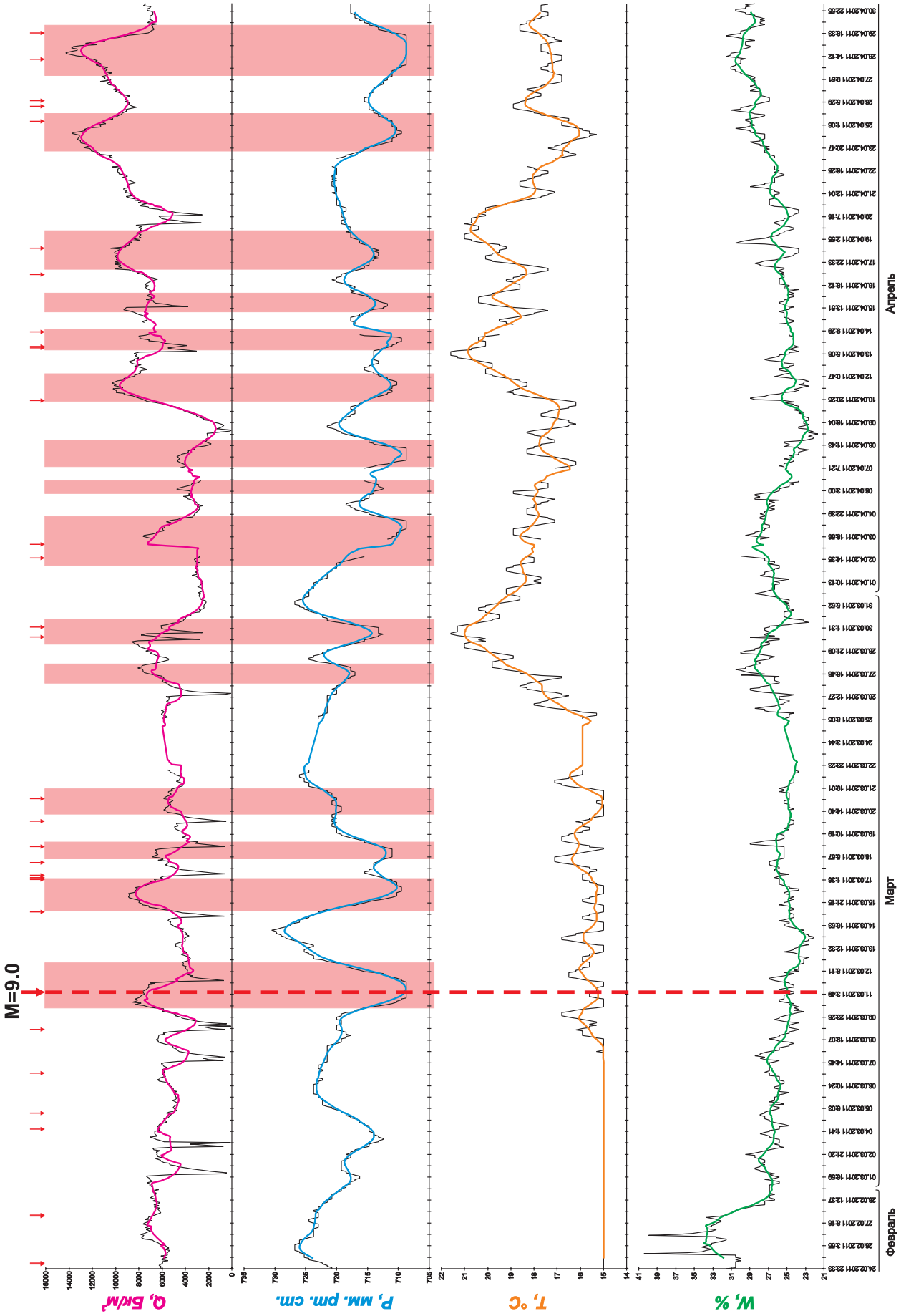


Рис. 3. Графики временных вариаций объемной активности радона (Q), атмосферного давления (P), температуры (T) и относительной влажности (W) воздуха, полученные по данным мониторинга на станции «Тырган» с февраля по апрель 2011 г.

Fig. 3. Curves of temporal variations of radon activity concentration (Q), atmospheric pressure (P), temperature (T), and relative air humidity (W), according to monitoring data recorded at the Tyrgan Station from February to April 2011.

го ремонта оборудования. Тренды акцентируют внимание на длиннопериодных вариациях параметра Q , которые представляют наибольший интерес при анализе мониторинговых данных, полученных для региона впервые. Для сопоставления вариаций параметра Q с сейсмичностью Байкальского рифта на рис. 2, 3 показаны моменты землетрясений с $M \geq 2.8$ в соответствии с базой данных Байкальского филиала геофизической службы СО РАН (<http://www.seis-bykl.ru>).

3. РЕЗУЛЬТАТЫ МОНИТОРИНГА ЭМАНАЦИОННЫХ И МЕТЕОПАРАМЕТРОВ НА СТАНЦИИ «ТЫРГАН»

Результаты мониторинга показали (рис. 2, 3), что объемная активность радона в период весна-осень менялась от сотен до ≈ 15642 Бк/м³ в режиме колебаний. Визуально выделяется несколько гармоник с разными периодами. Наибольший из них, по-видимому, соответствует году: от величины 15642 Бк/м³, измеренной в мае 2010 г., концентрация почвенного радона последовательно проходит уровни более низких значений, а затем к концу апреля 2011 г. достигает практически той же максимальной величины – 14245 Бк/м³. Еще две гармоники, о существовании которых можно судить достаточно определенно даже без статистической обработки данных, имеют четырехсуточный и суточный периоды колебаний. Первая гармоника дает наибольший вклад в вариации параметра Q относительно отмеченного выше годового тренда, а вторая играет аналогичную роль по отношению к первой гармонике. Кроме этих периодических изменений объемной активности радона, на кривых выделяются кратковременные (менее суток) и существенные по амплитуде отскоки величины Q вниз от общего тренда с последующим восстановлением уровня (23.08.2010 г., 05.09.2010 г., 22.09.2010 г., 30.09.2010 г., 03.10.2010 г., 01.03.2011 г., 03.03.2011 г., 11.03.2011 г., 26.03.2011 г., 20.04.2011 г.).

Анализ вариаций метеопараметров (рис. 2, 3) свидетельствует, что изменения относительной влажности (W) и температуры (T) воздуха в отдельные периоды времени обнаруживают некоторое подобие с вариациями объемной активности радона. Однако для установления характера и значимости этих связей необходим более длительный и непрерывный ряд данных. В противоположность этому изменение атмосферного давления (P) имеет явно выраженное подобие с характером колебаний, установленным для объемной активности радона. Выделяется общий тренд годовых изменений и две гармоники с четырехсуточными и суточными периодами. При этом колебания объемной активности радона и атмосферного давления происходят в противофазе. Максимумам параметра Q соответствуют минимумы величины P и наоборот, что на рис. 2, 3 подчеркнуто полосами розового цвета. Заметное и длительное нарушение выявленной закономерности

отмечается только в период 24.02–11.03.2011 г., окончание которого совпало с сильнейшим японским землетрясением ($M=9.0$).

Изучение землетрясений с $M \geq 2.8$, произошедших в Байкальской рифтовой зоне в период мониторинга, свидетельствует, что в большинстве случаев они попадают в полосы, которым на рис. 2, 3 соответствуют минимумы атмосферного давления и максимумы объемной активности радона. Однако и эта закономерность была нарушена в период, предшествовавший катастрофическому землетрясению в Японии. Характерно то, что моменту главного толчка соответствуют значимые минимум давления и максимум параметра Q , но сейсмических событий с $M \geq 2.8$ в Байкальском рифте в это время не происходило. Вместе с тем спустя 4 сут проявился всплеск сейсмической активности, который продолжался в течение следующих 7 сут. Это самая интенсивная сейсмическая активизация за рассматриваемый период, включающая девять землетрясений с $M \geq 2.8$, в т.ч. и наиболее сильное событие 17.03.2011 г. ($M=5.6$). Резкие суточные падения и восстановления величины Q до уровня общего тренда проявились с наибольшей частотой в период времени, ассоциирующийся с сильнейшим землетрясением в Японии: девять случаев с 1 по 20 марта 2011 г.

В целом анализ первых рядов постоянных измерений объемной активности радона в Центральном Прибайкалье позволил установить, что на локальном участке активной сбросовой зоны значение Q варьировалось за период весна-лето-осень от 201 до 15642 Бк/м³. Изменения имеют характер колебаний, которые по периодам 1 и 4 сут совпадают с вариациями атмосферного давления, но происходят в противофазе. К временным отрезкам, характеризующимся максимальными значениями объемной активности радона и минимальными величинами давления, часто приурочены землетрясения с $M \geq 2.8$, произошедшие на обширной территории Байкальского рифта. Самое заметное нарушение этой закономерности ассоциируется с периодом катастрофического землетрясения в Японии (11.03.2011 г.), которое спустя 4 сут проявилось всплеском сейсмической активности в Байкальском рифте. Несмотря на сложные взаимосвязи рассматриваемых факторов, для Западного Прибайкалья выделяется летний период с начала июля по конец августа, благоприятный для проведения полевой радоновой съемки, поскольку в это время имеют место сравнительно небольшие колебания параметра Q .

4. ФАКТОРЫ, ОБУСЛОВЛИВАЮЩИЕ ВРЕМЕННЫЕ ВАРИАЦИИ РАДОНОВОЙ АКТИВНОСТИ РАЗЛОМОВ ЗАПАДНОГО ПРИБАЙКАЛЬЯ

Интерпретируя полученные результаты, следует отметить, что форма и амплитуда аномалии радона, фиксируемой в почвенном воздухе, в существенной

мере определяются проницаемостью и активностью отдельных участков разломной зоны, характерных для периода измерений. Изменения проницаемости и активности, как известно, обусловлены геодинамическими, планетарными и другими факторами. Их роль в формировании аномалий почвенного радона и временных вариациях его объемной активности можно в первом приближении оценить на основе результатов мониторинга.

Согласно полученным данным, вариации объемной активности радона в «чувствительной» точке Тырган-Кучелгинской разломной зоны охватывают более одного порядка данной величины и являются колебательными по типу (рис. 2, 3). Существенное изменение проницаемости и деформационной активности во времени обусловлено интенсивными изменениями напряженного состояния горного массива под воздействием внешних (планетарных) и внутренних (геодинамических) факторов. Влияние первой группы факторов выражается в синхронных колебаниях объемной активности радона и атмосферного давления, которые происходят в противофазе. Преобладание суточных и четырехсуточных периодов свидетельствует, что на напряженное состояние горного массива влияют, соответственно, лунные приливы, а также циклонические явления, связанные с взаимодействием Земля–Солнце [Spivak, 2010]. Влияние второй группы факторов выражается в отчетливой связи вариаций объемной активности радона с землетрясениями. Период активизации сейсмического процесса в Байкальском рифте, обусловленный подготовкой и главным толчком сильнейшего землетрясения в Японии (24.02–20.03.2011 г.), отразился в вариациях объемной активности радона. Произошла серия кратковременных скачкообразных изменений параметра Q , которые, судя по аналогичным вариациям в других регионах [Baykara et al., 2009; Utkin, Yurkov, 2010], можно связать с импульсными подвижками по разломам.

Внешние и внутренние факторы действуют совместно, но их роль в вариациях объемной активности радона различна в отдельные отрезки времени. Большую часть периода наблюдений выход радона контролируют планетарные факторы. Эксхалляция усиливается и уменьшается в соответствии с периодическими колебаниями атмосферного давления, которые приводят, соответственно, к раскрытию или закрытию пор и трещин в горных породах. При этом в периоды уменьшения внешнего давления может происходить частичная разрядка внутренних напряжений посредством сравнительно слабых землетрясений. Определяющее воздействие атмосферного давления на выход радона нарушается, когда в результате интенсивных движений по разломам в Байкальском рифте или резких подвижек плит в смежных активных зонах (например, в связи с сильнейшим землетрясением в Японии) внутренние напряжения превышают определенный уровень. В эти сравнительно короткие периоды време-

ни, отличающиеся повышением сейсмической активности, влияние геодинамических напряжений на проницаемость и выход радона становится определяющим.

Рассмотренные закономерности представляют конкретные условия эманаций, характерные для массива горных пород вблизи Тырган-Кучелгинского сброса. Однако подобные закономерности выявлены и для других регионов [Schery et al., 1982; Rudakov, 1985; Spivak, 2010]. Более того, нарушение синхронности вариаций метеопараметров и объемной активности радона используется некоторыми авторами [Zmazek et al., 2003] как предвестник готовящегося землетрясения. Следовательно, взаимосвязи объемной активности радона, атмосферного давления и сейсмической активности, выявленные при анализе данных мониторинга со станции «Тырган», отражают более общую картину изменения проницаемости горных пород в зоне активного разлома земной коры.

5. ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Данные, полученные для зоны Приморского сброса в Западном Прибайкалье, сопоставленные с цитированными выше результатами мониторинговых исследований в других регионах мира, позволяют отразить установленные закономерности в виде модели, представленной на рис. 4.

Большую часть времени колебаниями активности почвенного радона руководит атмосферное давление (рис. 4). Его увеличение препятствует, а уменьшение, наоборот, способствует выходу радона в атмосферу. Синхронность таких колебаний нарушается в периоды накопления и разрядки значительных напряжений, происходящих в результате перемещений крупных блоков горных пород, которые вызваны местным или удаленным энергетическим источником. В эти сравнительно короткие периоды времени возрастает сейсмическая активность, проницаемость горных пород меняется в импульсном режиме, что отражается в виде серии кратковременных (менее суток) скачкообразных изменений объемной активности радона. Таким образом, временные вариации радоновой активности в разломных зонах Прибайкалья контролируются внутренними (геодинамическими) и внешними (планетарными) факторами, которые действуют совместно, но в каждый конкретный момент времени в разных соотношениях.

Таким образом, анализ мониторинговых измерений объемной активности почвенного радона на примере Тырган-Кучелгинского сброса позволил впервые для Западного Прибайкалья выявить принципиальные особенности вариаций параметра Q во времени и их зависимость от внешних и внутренних факторов. Перспективы этих исследований связаны с созданием сети мониторинговых станций и получением более длинных

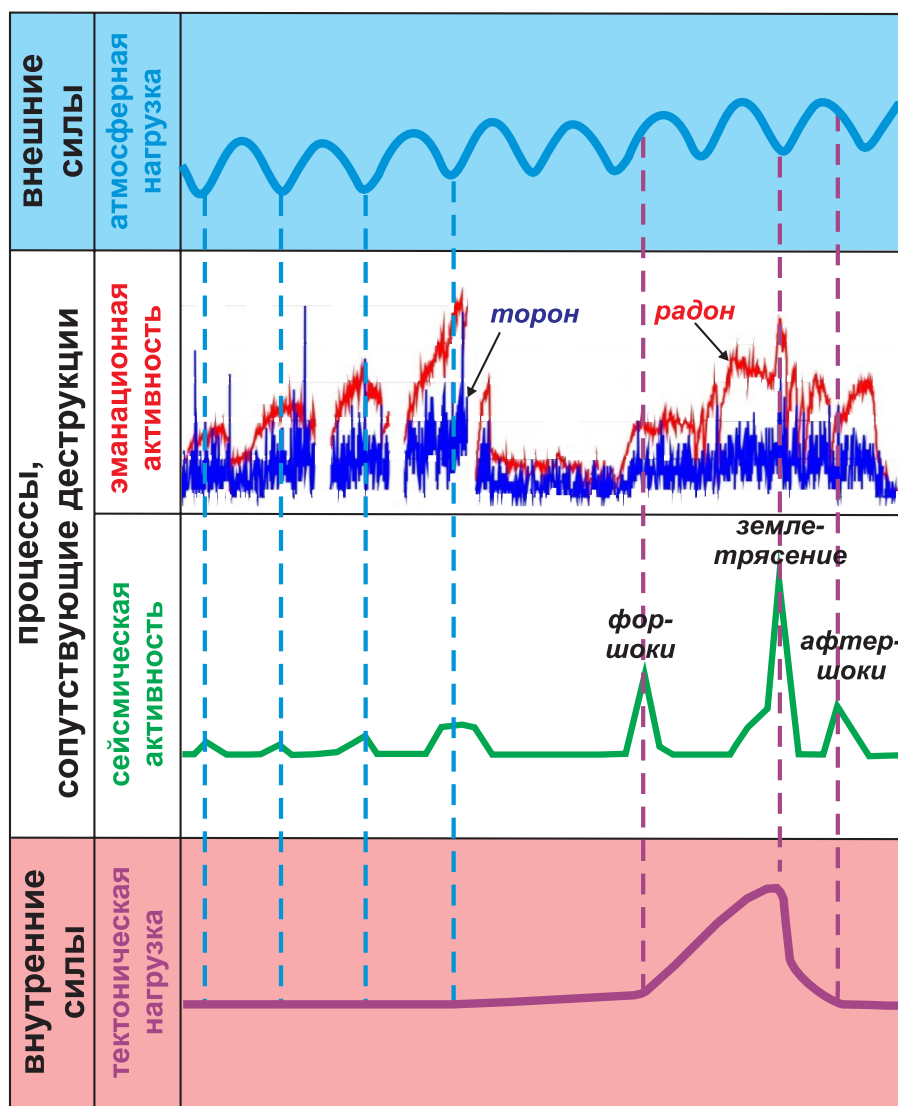


Рис. 4. Особенности проявления эманационной и сейсмической активности разломных зон в ответ на воздействие внешних и внутренних факторов. Вариации активности почвенных радона и торона соответствуют реальным измерениям в 2010 г. на станции мониторинга «Тырган» (Западное Прибайкалье).

Fig. 4. Specific features of radon emanation and seismic activity of fault zones in response to impacts of the external and internal factors. Variations of soil radon and thoron activity rates correspond to actual measurements at the Tyrgan Station, Western Pribaikalie in 2010.

рядов наблюдений. Это позволит выявить детали временных вариаций, которые могут иметь, в том числе, и прикладное значение в плане поиска эманационных предвестников сильных землетрясений на территории Прибайкалья.

Авторы благодарны сотрудникам БФ ГС СО РАН к.г.-м.н. В.В. Чечельницкому и инженеру А.Н. Тарбееву, а также к.г.-м.н. А.В. Черемных, инженерам

Р.М. Зарипову, А.С. Черемных и другим коллегам по лаб. тектонофизики Института земной коры СО РАН за активную помощь в сборе и обработке полевого материала по разломам Прибайкалья.

Работы выполнены при поддержке ФЦП «Научные и научно-педагогические кадры инновационной России на 2009–2013 годы» (соглашение № 14.В37.21.0583), а также СО РАН (проект ОНЗ-7.6).

6. ЛИТЕРАТУРА

Al-Bataina B.A., Al-Taj M.M., Atallah M.Y., 2005. Relation between radon concentrations and morphotectonics of the Dead Sea transform in Wadi Araba, Jordan. *Radiation Measurements* 40 (2–6), 539–543. <http://dx.doi.org/10.1016/j.radmeas.2005.06.023>.

Angelone M., Gasparini C., Guerra M., Lombardi S., Pizzino L., Quattrocchi F., Sacchi E., Zuppi G.M., 2005. Fluid

- geochemistry of the Sardinian Rift-Campidano Graben (Sardinia, Italy): fault segmentation, seismic quiescence of geochemically «active» faults, and new constraints for selection of CO₂ storage sites. *Applied Geochemistry* 20 (2), 317–340. <http://dx.doi.org/10.1016/j.apgeochem.2004.08.008>.
- Atallah M.Y., Al-Bataina B.A., Mustafa H., 2001. Radon emanation along the Dead Sea transform (rift) in Jordan. *Environmental Geology* 40 (11–12), 1440–1446. <http://dx.doi.org/10.1007/s002540100337>.
- Baykara O., Inceoz M., Dogru M., Aksoy E., Kulahci F., 2009. Soil radon monitoring and anomalies in East Anatolian fault system (Turkey). *Journal of Radioanalytical and Nuclear Chemistry* 279 (1), 159–164. <http://dx.doi.org/10.1007/s10967-007-7211-2>.
- Chernyago B.P., Nepomnyashchikh A.I., Kalinovskii G.I., 2008. Soil-to-dwelling radon isotope ratio in the Baikal region. *Russian Geology and Geophysics* 49 (12), 971–977. <http://dx.doi.org/10.1016/j.rgg.2008.03.009>.
- Chernyago B.P., Nepomnyashchikha A.I., Medvedev V.I., 2012. Current radiation environment in the Central Ecological Zone of the Baikal Natural Territory. *Russian Geology and Geophysics* 53 (9), 926–935. <http://dx.doi.org/10.1016/j.rgg.2012.07.008>.
- Cicerone R.D., Ebel J.E., Britton J., 2009. A systematic compilation of earthquake precursors. *Tectonophysics* 476 (3–4), 371–396. <http://dx.doi.org/10.1016/j.tecto.2009.06.008>.
- Delvaux D., Moyes R., Stapel G., Petit C., Levi K., Miroshnichenko A., Ruzhich V., San'kov V., 1997. Paleostress reconstruction and geodynamics of the Baikal region, Central Asia, Part 2. Cenozoic rifting. *Tectonophysics* 282 (1–4), 1–38. [http://dx.doi.org/10.1016/S0040-1951\(97\)00210-2](http://dx.doi.org/10.1016/S0040-1951(97)00210-2).
- Dombrovskaya Zh.V., 1973. The Paleogene Weathering Crust of the Central Baikal. Nauka, Moscow, 153 p. (in Russian) [Домбровская Ж.В. Палеогеновая кора выветривания Центрального Прибайкалья. М.: Наука, 1973. 153 с.].
- Font Ll., Baixeras C., Moreno V., Bach J., 2008. Soil radon levels across the Amer fault. *Radiation Measurements* 43 (Supplement 1), S319–S323. <http://dx.doi.org/10.1016/j.radmeas.2008.04.072>.
- Ghosh D., Deb A., Sengupta R., 2009. Anomalous radon emission as precursor of earthquake. *Journal of Applied Geophysics* 69 (2), 67–81. <http://dx.doi.org/10.1016/j.jappgeo.2009.06.001>.
- Ioannides K., Papachristodoulou C., Stamoulis K., Karamanis D., Pavlides S., Chatzipetros A., Karakala E., 2003. Soil gas radon: a tool for exploring active fault zones. *Applied Radiation and Isotopes* 59 (2–3), 205–213. [http://dx.doi.org/10.1016/S0969-8043\(03\)00164-7](http://dx.doi.org/10.1016/S0969-8043(03)00164-7).
- Kemski J., Klingel R., Siehl A., 1996. Classification and mapping of radon affected areas in Germany. *Environment International* 22 (1), 789–798. [http://dx.doi.org/10.1016/S0160-4120\(96\)00185-7](http://dx.doi.org/10.1016/S0160-4120(96)00185-7).
- King C.Y., 1978. Radon emanation on San Andreas fault. *Nature* 271 (5645), 516–519. <http://dx.doi.org/10.1038/271516a0>.
- Koike K., Yoshinaga T., Asaue H., 2009. Radon concentrations in soil gas, considering radioactive equilibrium conditions with application to estimating fault-zone geometry. *Environmental Geology* 56 (8), 1533–1549. <http://dx.doi.org/10.1007/s00254-008-1252-x>.
- Koval P.V., Udodov Yu.N., San'kov V.A., Yasenovskii A.A., Andrulaitis L.D., 2006. Geochemical activity of faults in the Baikal rift zone (Mercury, Radon, and Thoron). *Doklady Earth Sciences* 409 (6), 912–915. <http://dx.doi.org/10.1134/S1028334X06060171>.
- Levi K.G., Arzhannikova A.V., Buddo V.Yu., Kirillov P.G., Lukhnev A.V., Miroshnichenko A.I., Ruzhich V.V., San'kov V.A., 1997. Recent geodynamics of the Baikal rift. *Razvedka i okhrana neдр* 1, 10–20 (in Russian) [Леви К.Г., Аржанникова А.В., Буддо В.Ю., Кириллов П.Г., Лукнев А.В., Мирошниченко А.И., Ружич В.В., Саньков В.А. Современная геодинамика Байкальского рифта // Разведка и охрана недр. 1997. № 1. С. 10–20].
- Logachev N.A., 2003. History and geodynamics of the Baikal rift. *Russian Geology and Geophysics* 44 (5), 391–406.
- Logachev N.A., Florensov N.A., 1977. The Baikal system of rift basins. In: The role of rifting in the geological history of the Earth. Nauka, Novosibirsk, p. 19–29 (in Russian) [Логачев Н.А., Флоренсов Н.А. Байкальская система рифтовых долин // Роль рифтогенеза в геологической истории Земли. Новосибирск: Наука, 1977. С. 19–29].
- Mats V.D., Ufimtsev G.F., Mandelbaum M.M., Alakshin A.M., Pospeev A.V., Shimaraev M.N., Khlystov O.M., 2001. The Cenozoic Baikal Rift Basin: Its Structure and Geological History. Publishing House of SB RAS, Geo Branch, Novosibirsk, 252 p. (in Russian) [Мац В.Д., Уфимцев Г.Ф., Мандельбаум М.М., Алакишин А.М., Поспеев А.В., Шимараев М.Н., Хлыстов О.М. Кайнозой Байкальской рифтовой впадины: строение и геологическая история. Новосибирск: Издательство СО РАН. Филиал «Гео», 2001. 252 с.].
- Mel'nikova V.I., Radziminovich N.A., 1998. Mechanisms of action of earthquake foci in the Baikal region over the period 1991–1996. *Geologiya i Geofizika* 39 (11), 1598–1607.
- Petit C., Deverchere J., Houdry-Lemont F., Sankov V., Melnikova V., Delvaux D., 1996. Present-day stress field changes along the Baikal rift and tectonic implications. *Tectonics* 15 (6), 1171–1191. <http://dx.doi.org/10.1029/96TC00624>.
- Richon P., Klinger Y., Tapponnier P., Li C.-X., Van Der Woerd J., Perrier F., 2010. Measuring radon flux across active faults: Relevance of excavating and possibility of satellite discharges. *Radiation Measurements* 45 (2), 211–218. <http://dx.doi.org/10.1016/j.radmeas.2010.01.019>.
- Rikitake T., 1978. Biosystem behaviour as an earthquake precursors. *Tectonophysics* 51 (1–2), 1–20. [http://dx.doi.org/10.1016/0040-1951\(78\)90048-3](http://dx.doi.org/10.1016/0040-1951(78)90048-3).

- Rudakov V.P., 1985. On baric variations of subsoil radon. *Geokhimiya* 1, 124–127 (in Russian) [Рудаков В.П. О барических вариациях подпочвенного радона // Геохимия. 1985. № 1. С. 124–127].
- Ruzhich V.V., 1997. Seismotectonic Destruction in the Crust of the Baikal Rift Zone. Publishing House of SB RAS, Novosibirsk, 144 p. (in Russian) [Ружич В.В. Сейсмотектоническая деструкция в земной коре Байкальской рифтовой зоны. Новосибирск: Издательство СО РАН, 1997. 144 с.].
- Schery S.D., Gaedert D.H., Wilkening M.H., 1982. Transport of radon from fractured rock. *Journal of Geophysical Research: Solid Earth* 87 (B4), 2969–2976. <http://dx.doi.org/10.1029/JB087iB04p02969>.
- Seminsky K.Zh., Bobrov A.A., 2009a. Radon activity of faults (Western Baikal and Southern Angara areas). *Russian Geology and Geophysics* 50 (8), 674–684. <http://dx.doi.org/10.1016/j.rgg.2008.12.010>.
- Seminsky K.Zh., Bobrov A.A., 2009b. Comparative assessment of radon activity for different fault types and scale ranks in the Baikal rift and South of the Siberian Platform. *Doklady Earth Sciences* 427 (6), 915–919. <http://dx.doi.org/10.1134/S1028334X09060063>.
- Seminsky K.Zh., Bobrov A.A., 2012. Spatial and temporal variations of soil-radon activity in fault zones of the Pribaikalie (East Siberia, Russia). In: Z. Li, C. Feng (Eds.), *Handbook of Radon: Properties, Applications and Health*. Chapter 1, Nova Science Publication Inc.: New York, p. 1–36.
- Seminsky K.Zh., Kozhevnikov N.O., Cheremnykh A.V., Pospееva E.V., Bobrov A.A., Olenchenko V.V., Tugarina M.A., Potapov V.V., Burzunova Yu.P., 2012. Interblock zones of the Northwestern Baikal rift: results of geological and geophysical studies along the Bayandai Village–Cape Krestovskii profile. *Russian Geology and Geophysics* 53 (2), 250–269. <http://dx.doi.org/10.1016/j.rgg.2011.12.016>.
- Sherman S.I., 1977. Physical Laws of Crustal Faults. Nauka, Novosibirsk, 102 p. (in Russian) [Шерман С.И. Физические закономерности развития разломов земной коры. Новосибирск: Наука, 1977. 102 с.].
- Spivak A.A., 2010. The specific features of geophysical fields in the fault zones. *Izvestiya, Physics of the Solid Earth* 46 (4), 327–338. <http://dx.doi.org/10.1134/S1069351310040051>.
- Tansi C., Tallarico A., Iovine G., Folino Gallo M., Falcone G., 2005. Interpretation of radon anomalies in seismotectonic and tectonic-gravitational settings: the south-eastern Crati graben (Northern Calabria, Italy). *Tectonophysics* 396 (3–4), 181–193. <http://dx.doi.org/10.1016/j.tecto.2004.11.008>.
- Toutain J.-P., Baubron J.-C., 1999. Gas geochemistry and seismotectonics: a review. *Tectonophysics* 304 (1–2), 1–27. [http://dx.doi.org/10.1016/S0040-1951\(98\)00295-9](http://dx.doi.org/10.1016/S0040-1951(98)00295-9).
- Utkin V.I., Mamyrov E., Kan M.V., Krivashev S.V., Yurkov A.K., Kosyakin I.I., Shishkanov A.N., 2006. Radon monitoring in the Northern Tien Shan with application to the process of tectonic earthquake nucleation. *Izvestiya, Physics of the Solid Earth* 42 (9), 775–784. <http://dx.doi.org/10.1134/S1069351306090072>.
- Utkin V.I., Yurkov A.K., 2010. Radon as a tracer of tectonic movements. *Russian Geology and Geophysics* 51 (2), 220–227. <http://dx.doi.org/10.1016/j.rgg.2009.12.022>.
- Voitov G.I., 1998. Application of the neural network approach to the reconstruction of a three-dimensional geoelectric structure. *Izvestiya, Physics of the Solid Earth* 34 (1), 33–39.
- Zmazek B., Todorovski L., Dzeroski S., Vaupotic J., Kobal I., 2003. Application of decision trees to the analysis of soil radon data for earthquake prediction. *Applied Radiation and Isotopes* 58 (6), 697–706. [http://dx.doi.org/10.1016/S0969-8043\(03\)00094-0](http://dx.doi.org/10.1016/S0969-8043(03)00094-0).
- Zolotarev A.G., Khrenov P.M., 1979. Map of Recent Tectonics of the Southern East Siberia, scale 1: 1 500 000 (in Russian) [Золотарев А.Г., Хренов П.М., 1979. Карта новейшей тектоники юга Восточной Сибири. Масштаб 1 : 1 500 000].
- Zubkov S.I., 1981. Radon earthquake precursors. *Vulkanologiya i Seismologiya* 6, 74–105 (in Russian) [Зубков С.И. Радонные предвестники землетрясений // Вулканология и сейсмология. 1981. № 6. С. 74–105].



Семинский Константин Жанович, докт. геол.-мин. наук, зав. лабораторией тектонофизики
Институт земной коры СО РАН
664033, Иркутск, ул. Лермонтова, 128, Россия
Тел.: 8(3952)423027; ✉ e-mail: seminsky@crust.irk.ru

Seminsky, Konstantin Zh., Doctor of Geology and Mineralogy, Head of Laboratory of Tectonophysics
Institute of the Earth's Crust, Siberian Branch of RAS
128 Lermontov street, Irkutsk 664033, Russia
Tel.: 8(3952)423027; ✉ e-mail: seminsky@crust.irk.ru



Бобров Александр Анатольевич, канд. геол.-мин. наук, м.н.с.

Институт земной коры СО РАН

664033, Иркутск, ул. Лермонтова, 128, Россия

Тел.: 89086603375; e-mail: alexbob@crust.irk.ru

Bobrov, Alexander A., Candidate of Geology and Mineralogy, Junior Researcher

Institute of the Earth's Crust, Siberian Branch of RAS

128 Lermontov street, Irkutsk 664033, Russia

Tel.: 89086603375; e-mail: alexbob@crust.irk.ru