

СЕЙСМОЛОГИЯ

УДК 556.043+550.34.06.013.22 (571.55)

НАРУШЕНИЕ ВЗАИМОСВЯЗИ ВАРИАЦИЙ ОБЪЕМНОЙ АКТИВНОСТИ РАДОНА И АТМОСФЕРНОГО ДАВЛЕНИЯ В ПЕРИОДЫ СЕЙСМИЧЕСКИХ АКТИВИЗАЦИЙ (НА ПРИМЕРЕ ПРИБАЙКАЛЬЯ)

© 2023 г. К. Ж. Семинский^{1,*}, А. А. Бобров¹

Представлено академиком РАН Е.И. Гордеевым 20.01.2023 г.

Поступило 23.01.2023 г.

После доработки 24.01.2023 г.

Принято к публикации 26.01.2023 г.

Проведено сопоставление временных вариаций атмосферного давления и концентрации почвенного радона, измеренной в рыхлых отложениях на трех станциях мониторинга в Прибайкалье для периода проявления достаточно сильных землетрясений – Быстринского (21.09.2020 г., $K = 14.6$), Кударинского (09.12.2020 г., $K = 14.0$) и Хубсугульского (11.01.2021 г., $K = 16.0$). Используемая система эманационного мониторинга позволила установить, что выход радона из недр контролируется вариациями атмосферного давления. Нарушения этой зависимости, впервые выявленные в ходе формализованного статистического анализа, имеют место для каждой из изученных сейсмических активизаций. Они связаны с процессом подготовки землетрясения, что при расширении сети мониторинга открывает реальные возможности для разработки эманационного подхода к среднесрочному прогнозированию.

Ключевые слова: радон, атмосферное давление, мониторинг, землетрясение

DOI: 10.31857/S2686739723600169, **EDN:** DUSRCV

Поле почвенного радона отражает изменения напряженно-деформированного состояния (НДС) пород, происходящие в том числе и в периоды сейсмических активизаций. Как следствие, эманационный мониторинг проводится во многих странах мира и представляет одну из важных составляющих прогнозирования сильных землетрясений [7, 9–11, 15, 16]. Эффективность подобных исследований определяется степенью устойчивости характера эманационного отклика на сейсмические события в пункте мониторинга. Для поля радона он зависит от многих факторов и поэтому отличается для разных природных обстановок. В некоторых регионах [3, 4, 12–14, 17] эффективное выявление радоновых предвестников землетрясений характеризуется определенными перспективами в связи с существованием устойчивой связи объемной активности радона (ОАР) и атмосферного давления (P): отклонение от синхронности вариаций ОАР и P является дополнительным признаком изменения НДС в период подготовки землетрясений под действием тектонических сил.

К подобным регионам относится Прибайкалье, где при использованной системе мониторинга зафиксирована устойчивая обратная связь концентрации радона в почве и атмосферного давления [1]. Задачами представленных ниже исследований были: 1) формализованное выявление нарушений в синхронности вариаций ОАР и P на основе статистического анализа рядов мониторинга, а также 2) сопоставление подобных аномалий с сейсмическими активизациями в Байкальской рифтовой зоне (БРЗ) для оценки перспектив эффективного выявления эманационных предвестников землетрясений в Прибайкалье.

При анализе использовались данные мониторинга объемной активности радона в рыхлых отложениях на станциях “Листвянка”, “Бугульдейка” и “Тырган” (рис. 1 а). Измерение данного параметра осуществлялось на глубине ~2.5 м датчиками ВМС-2. Кроме величины ОАР, прибор с периодичностью 1 ч фиксировал дату, время и атмосферное давление. Базовыми для обработки данных мониторинга стали ряды измерений, полученные для станций “Тырган” и “Листвянка” с июля 2020 г. по март 2021 г. (рис. 1 в). Станция “Бугульдейка” была создана в конце сентября 2020 г. и некоторое время не работала в декабре 2020 г. по причине проведения профилактических работ. Период мониторинга характеризу-

¹Институт земной коры Сибирского отделения Российской академии наук, Иркутск, Россия

*E-mail: seminsky@crust.irk.ru

вался всплеском сейсмической активности в БРЗ, который проявился в виде трех достаточно сильных для Прибайкалья землетрясений (рис. 1 а, в) – Быстринского (21.09.2020 г., $K = 14.6$), Кударинского (09.12.2020 г., $K = 14.0$) и Хубсугульского (11.01.2021 г., $K = 16.0$). Они, как и еще одно сейсмическое событие “А” (06.02.2021 г., $K = 11.7$), зафиксированное вблизи эпицентра Кударинского землетрясения, должны проявляться во флуктуациях эманационного поля, т.к. пункты мониторинга, согласно расчетам по формуле И.П. Добровольского [8], попадают в зону влияния каждого из перечисленных событий.

Визуальный анализ графиков ОАР и P позволил сделать два основных вывода. Во-первых, рассматриваемые землетрясения не отражаются однотипными флуктуациями ОАР (например, изменением характера вариаций, экстремумами параметра и пр.), а на некоторых станциях и вовсе не проявлены в эманационном поле. Во-вторых, на каждой станции отчетливо выделяется обратная зависимость концентрации радона от атмосферного давления. Как видно по полосам голубого цвета на фрагменте кривых, приведенных на рис. 1 б для станции “Тырган”, минимумам P можно поставить в соответствие максимумы величины ОАР и, наоборот, что особенно отчетливо проявлено при сопоставлении графика изменения давления (фиолетовый цвет) и тренда вариаций объемной активности радона (см. кривую красного цвета).

С целью повышения эффективности анализа графиков вариаций ОАР и P , которые при одинаковой частоте измерений (1 ч) характеризуются существенно разной интенсивностью колебаний (рис. 1 б), для каждого из них была рассчитана информационная энтропия (S_{inf}):

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

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

$$\sum_{i=1}^K w_i = 1 [6].$$

Данный параметр является среднестатистической мерой неопределенности в поведении каждой из рассматриваемых величин во времени.

Величины информационной энтропии, рассчитанной для объемной активности радона и атмосферного давления, в последующем описании обозначаются символами S_{OAP} и S_P соответственно. Их вариации характеризуются наличием серии отчетливо выделяющихся минимумов (рис. 1 б). Связь подобных экстремумов, обусловленных вариациями ОАР, с сейсмическими активизациями

не выявлена. Однако даже при визуальной оценке видно, что минимумы параметров S_{OAP} и S_P в подавляющем большинстве случаев проявляются синхронно (рис. 1 б).

Таким образом, как и следовало ожидать, сейсмические активизации Прибайкалья не отражаются в однотипных вариациях объемной активности радона или рассчитанной по данному параметру информационной энтропии. В то же время при системе мониторинга, организованной на станциях, выявляется устойчивая связь временных изменений ОАР и P . Она имеет место в течение всего периода систематических измерений, что на новом, более представительном фактическом материале подтверждает сделанный ранее для Прибайкалья вывод об определяющей роли атмосферного давления в эксхалляции радона [1].

Поиск кратковременных нарушений синхронности вариаций объемной активности радона и атмосферного давления, которые могут иметь место в процессе подготовки и реализации сильных землетрясений, осуществлялся посредством анализа изменения во времени тесноты связи между данными параметрами. Коэффициент корреляции оценивался в скользящем окне как для зависимости между самими величинами ОАР и P (R), так и для связи между информационными энтропиями (R_S), рассчитанными по этим параметрам (рис. 1 в). Величина окна равнялась 24 сут, поскольку это значение представляет период гармоники, которая, согласно данным Фурье-анализа, выделяется в вариациях как объемной активности радона, так и атмосферного давления на всех станциях мониторинга.

Согласно рис. 1 в, коэффициент корреляции обратной зависимости между ОАР и P варьирует для станции “Листвянка” от -0.86 до $+0.36$, для станции “Тырган” – от -0.6 до $+0.16$ и для станции “Бугульдейка” – от -0.36 до $+0.17$. Коэффициент корреляции прямой связи между параметрами S_{OAP} и S_P изменяется для станции “Листвянка” от $+0.85$ до -0.29 , для станции “Тырган” – от $+0.81$ до 0 и для станции “Бугульдейка” – от $+0.8$ до -0.16 . Вариации коэффициентов имеют в целом вид колебаний, характер которых не обнаруживает ярко выраженных соответствий при визуальном сопоставлении кривых R и R_S для отдельных станций или при сравнении графиков однотипных коэффициентов для разных пунктов мониторинга. В то же время экстремальные значения параметров, свидетельствующие о нарушении анализируемых связей, проявляются достаточно отчетливо (рис. 1 в) и в некоторых случаях явно тяготеют к моментам проявления сильных землетрясений.

Для того, чтобы формализовать анализ взаимосвязи сейсмических активизаций и подобных отклонений от общих трендов в изменениях па-

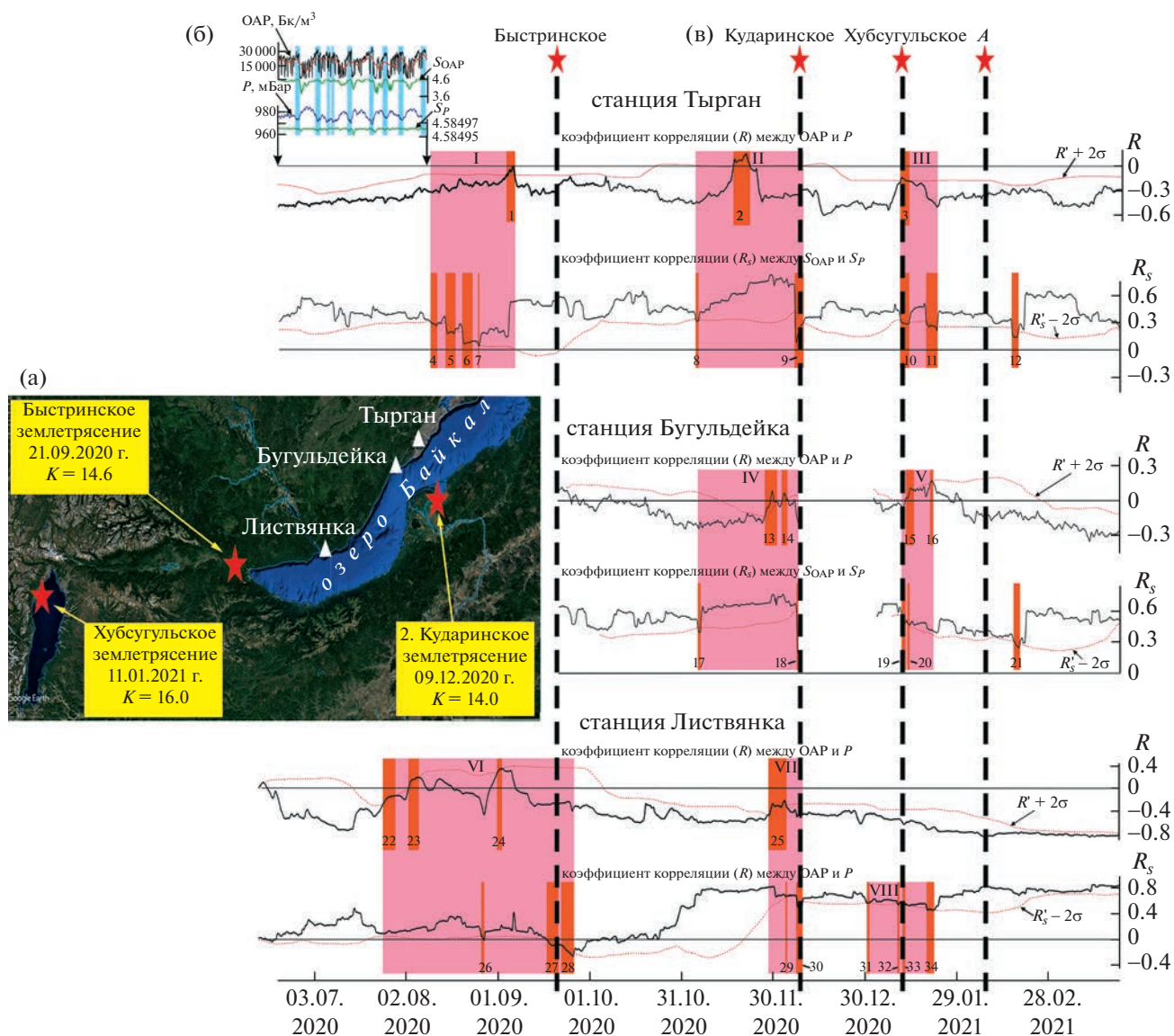


Рис. 1. Сопоставление аномалий, выявленных при анализе корреляционных связей между объемной активностью радона (ОАР) и атмосферным давлением (P) для станций “Тырган”, “Бугульдейка” и “Листвянка”. (а) Положение станций эманационного мониторинга, а также эпицентров землетрясений (данные БФ ФИЦ ЕГС РАН: <http://seis-bykl.ru>). (б) Примеры графиков вариаций во времени параметров ОАР, P , $SOAR$ и Sp , измеренных на станции “Тырган” для периода 22.06.2020 г. – 09.08.2020 г. ОАР – объемная активность радона; P – атмосферное давление; $SOAR$ и Sp – величины информационной энтропии, рассчитанные для параметров ОАР и P ; красная кривая – тренд изменений параметра ОАР; голубые полосы – соответствие максимумов ОАР минимумам P . (в) Графики вариаций коэффициентов парной корреляции, рассчитанных в скользящем окне (24 сут) для связей между величинами ОАР и P (R), а также между информационными энтропиями $SOAR$ и Sp , вычисленными по параметрам ОАР и P (R_S), для периода проявления серии сейсмических активизация в Прибайкалье (июль 2020 г. – март 2021 г.). σ – среднеквадратическое отклонение; R' и R'_S – средние арифметические значения для величин R и R_S , вычисленные в расчетном окне; звездочки и вертикальные штрихпунктирные линии – моменты землетрясений; оранжевые узкие полосы с арабскими цифрами внизу – аномалии (и их номера), выделенные по одному из параметров (R или R_S); розовые широкие полосы с римскими цифрами сверху – аномальные участки (и их номера), выделенные по обоим параметрам (R и R_S).

параметров R и R_S , аномалиями было принято считать отрезки графиков, для которых выполняются условия: $R > R' + 2\sigma$ и $R_S < R'_S - 2\sigma$, где R' – среднеарифметическое значение R в расчетном окне, R'_S – среднеарифметическое значение R_S в

расчетном окне, σ – среднеквадратическое отклонение. Всего было выделено 34 аномалии, которые обозначены на рис. 1 в полосами оранжевого цвета. Видно, что положение и размеры аномалий, зафиксированных на каждой из станций мониторинга, с большей или меньшей долей уве-

ренности можно считать обусловленными теми сейсмическими активизациями, которые имели место для Прибайкалья в течение изучаемого периода времени.

Наиболее отчетливо это проявлено при рассмотрении положения аномалий по отношению к моменту Кударинского землетрясения (рис. 1 в). На всех трех станциях мониторинга ему соответствуют небольшие по времени существования аномалии в вариациях коэффициента R_s — № 9, № 18 и № 30. В рядах параметра R аномалии более продолжительны и фиксируются до сейсмического события: на станции “Тырган” — № 2 (за 3 нед), на станции “Листвянка” — № 25 (за 10 дней), на станции “Бугульдейка” две аномалии — № 13 и 14 (за 10 и 5 дней соответственно). Кроме того, согласно данным деформационного мониторинга [5], небольшая аномалия № 17 в ряду вариаций R_s на станции “Бугульдейка” и соответствующая ей по времени и продолжительности аномалия № 8 на станции “Тырган” также могут быть обусловлены изменением НДС пород в период подготовки Кударинского события.

Моменту Хубсугульского землетрясения также соответствуют небольшие аномалии на всех станциях мониторинга и в рядах обоих параметров (№ 3, 10, 15, 19 и 33) за исключением пункта “Листвянка”, где для коэффициента R аномалия не выявлена (рис. 1 в). В то же время на данной станции рассматриваемая сейсмическая активизация проявилась полноценно в ряду вариаций коэффициента R_s . Кроме уже отмеченной аномалии № 33, один участок с аномальными значениями (№ 34) имел место через 7 сут после события и два участка до него — № 31 (за 11 дней) и № 32 (за 1 день). На двух других станциях аномалии выявлены только после сейсмического события: в рядах обоих параметров — для пункта “Бугульдейка” (№ 16 и 20) и в ряду вариаций коэффициента R_s — на станции “Тырган” (№ 11). Наиболее отдаленные из них (№ 11 и 16) зафиксированы, как и аномалия № 34 на станции “Листвянка”, примерно через неделю после землетрясения.

Сейсмическая активизация, включающая Быстринское землетрясение, проявилась менее однозначно, если судить по материалам, полученным с двух станций, работавших в рассматриваемый период времени (рис. 1 в). На станции “Листвянка” выделяются три аномалии в ряду вариаций параметра R_s : аномалия № 27 соответствует моменту землетрясения, тогда как аномалии № 26 и 28 зафиксированы за 25 сут до и через 2 дня после него. Для параметра R ближайшая к сейсмическому событию аномалия № 24 фиксируется за 19 дней до землетрясения. Характерно, что на станции “Тырган” данный параметр принимает аномальные значения примерно в это же время — за 16 дней до события (№ 1). Существует

здесь соответствие и по параметру R_s . Аномалии № 26 на станции “Листвянка” соответствует аномалия № 7 в пункте “Тырган”, но в последнем случае она принадлежит к пакету из четырех сближенных аномалий (№ 4–7), первая из которых появилась за 41 день до сейсмического события. Отмеченные соответствия дают основание считать, что участки аномальных значений коэффициентов R и R_s , зафиксированные для станции “Тырган”, как и близкие по времени проявления аномалии в пункте “Листвянка”, имеют прямое отношение к подготовке Быстринского события. Возможно, что два сближенных во времени участка аномальных значений R (№ 22 и 23), имевшие место за 56 и 48 дней до землетрясения, также связаны с рассматриваемой сейсмической активизацией, которая наиболее полно проявилась на станции “Листвянка”, расположенной существенно ближе других к эпицентру (рис. 1 а).

Кроме уже описанных аномалий, на рис. 1 в имеют место еще две небольших аномалии — № 12 и 21. Они зафиксированы в вариациях коэффициента R_s на близко расположенных станциях “Тырган” и “Бугульдейка”, имеют одинаковую продолжительность и время проявления — через 9 сут после события с индексом “А”, эпицентр которого расположен в районе Кударинского землетрясения. Если предположить, что участки № 12 и 21 обусловлены этим событием, то итогом проведенного анализа в целом является вывод о связи всех выявленных и показанных на рис. 1 в аномалий с подготовкой и реализацией землетрясений, в зону влияния которых попадают станции мониторинга радона.

Дополнительные, хотя и косвенные доказательства, справедливости сделанного вывода дает объединение сближенных во времени аномалий, выделенных по вариациям коэффициентов R и R_s (см. розовые полосы I–VIII на рис. 1 в). Так, для каждой из станций мониторинга отчетливо проявляются приуроченность и подобие расположения аномальных участков по отношению к моментам землетрясений. Более того, их размеры и положение находятся в соответствии с удаленностью пунктов от эпицентров сейсмических событий.

Во-первых, размеры аномальных участков, зафиксированных на близко расположенных станциях, больше, а строение их сложнее по отношению к тем, которые выявлены для отдаленных пунктов. Станция “Листвянка” по сравнению с пунктами “Бугульдейка” и “Тырган” расположена существенно ближе к районам проявления Хубсугульской и, особенно, Быстринской сейсмических активизаций (рис. 1 а). Это определяет большие размеры зафиксированных для нее аномальных участков (рис. 1 в): участка VIII по сравнению с участками V и III, а также участка VI по

сравнению с участком I. Обратные взаимоотношения наблюдаются для размеров аномальных участков, соответствующих Кударинской активизации: участки II (станция “Тырган”) и IV (станция “Бугульдейка”) больше участка VII (станция “Листвянка”), что объясняется большей удаленностью пункта “Листвянка” от эпицентра главного толчка.

Во-вторых, положение аномальных участков на графиках вариаций коэффициентов R и R_S по отношению к моменту землетрясения (рис. 1 в) также зависит от эпицентрального расстояния. Участки, соответствующие Быстринской и Кударинской активизациям (I, II, IV, VI и VII), располагаются на графиках до моментов землетрясений, т.е. отражают в эманационном поле процесс их подготовки. Для Хубсугульской активизации подобная картина имеет место только на ближней к эпицентру станции “Листвянка” (участок VIII). Для удаленных пунктов “Тырган” и “Бугульдейка” аномальные участки III и V выделяются после момента главного толчка, что объясняется различием в скоростях процессов подготовки и реализации землетрясения, которые отражаются в эманационном поле.

В заключение необходимо подчеркнуть, что временные рамки проявления эманационных аномалий, предшествующих главному толчку, не превышают двух месяцев, а наиболее отчетливые из них, как правило, укладываются в месячный интервал (рис. 1 в). Это полностью соответствует обобщенным представлениям о длительности этапа подготовки сильных землетрясений [2], согласно которым признаки относительно слабой активизации могут появляться примерно за 100 сут до главного толчка, а обратный, так называемый форшоковый, каскад — за 20–30 дней до землетрясения.

Таким образом, на примере Прибайкалья в результате ретроспективного анализа данных мониторинга установлены нарушения в синхронности временных вариаций объемной активности радона и атмосферного давления, которые обусловлены сейсмическими активизациями, включающими достаточно сильные для региона Быстринское, Кударинское и Хубсугульское землетрясения. Объективным показателем наличия подобных аномалий является удовлетворение условию, когда коэффициент парной корреляции (R) между ОАР и P превышает среднее значение плюс удвоенное среднеквадратическое отклонение (σ) или когда коэффициент корреляции связи между информационными энтропиями, рассчитанными по ОАР и P (R_S), меньше среднего минус 2σ .

Нарушения связи между ОАР и P в Прибайкалье отражают процесс подготовки сейсмического события, что открывает возможность для детального исследования аномальных участков на пред-

мет формализованного выделения предвестников сильных землетрясений. На данном этапе исследований для достижения этой цели должны анализироваться ряды изменений обоих коэффициентов корреляции (R и R_S), т.к. они характеризуются разной “чувствительностью” к нарушению синхронности вариаций ОАР и P и, таким образом, взаимно дополняют друг друга. Перспективы среднесрочного прогнозирования, базирующегося на подобном анализе эманационных данных, определяются созданием длинных рядов систематических измерений и сгущением сети мониторинга, что позволит формализовать определение времени основного толчка и, возможно, перейти к оценке параметров “место” и “сила” землетрясения.

ИСТОЧНИК ФИНАНСИРОВАНИЯ

Работы выполнены в рамках госзадания ИЗК СО РАН на 2021–2025 гг. “Современная геодинамика, механизмы деструкции литосферы и опасные геологические процессы в Центральной Азии” с использованием оборудования и инфраструктуры уникальной научной установки “Южно-Байкальский инструментальный комплекс для мониторинга опасных геодинамических процессов” Центра коллективного пользования “Геодинамика и геохронология” Института земной коры Сибирского отделения Российской академии наук по гранту 075-15-2021-682.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Семинский К.Ж., Бобров А.А. Первые результаты исследований временных вариаций эманационной активности разломов Западного Прибайкалья // Геодинамика и тектонофизика. 2013. № 1. С. 1–12.
2. Родкин М.В. О режиме сейсмической активизации в обобщенной окрестности сильного землетрясения // Физическая мезомеханика. 2008. Т. 11. № 1. С. 74–79.
3. Спивак А.А. Проявление разломных зон в геофизических полях // Геодинамика и тектонофизика. 2014. № 2. С. 507–525.
4. Фирстов П.П., Пономарев Е.А., Чернева Н.В., Бузевич А.В., Малышева О.П. К вопросу влияния баровариаций на поступления радона в атмосферу // Вулканология и сейсмология. 2007. № 6. С. 46–53.
5. Фундаментальные основы, методы и технологии цифрового мониторинга и прогнозирования экологической обстановки Байкальской природной территории. Отв. ред. И.В. Бычков, Д.П. Гладко-чуб, Г.М. Ружников. Новосибирск: СО РАН, 2022. 345 с.
6. Шеннон К. Работы по теории информации и кибернетике. М.: Изд-во ИЛ, 1963. 829 с.
7. Cicerone R.D., Ebel J.E., Britton J. A systematic compilation of earthquake precursors // Tectonophysics. 2009. V. 476 (3–4). P. 371–396.

8. 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.
9. Earthquake Research and Analysis – Statistical Studies, Observations and Planning // Ed. by Dr Sebastiano D'Amico. Publisher: InTech, 2012. 460 p.
10. Ghosh D., Deb A., Sengupta R. Anomalous radon emission as precursor of earthquake // *J. of Appl. Geophys.* 2009. V. 69 (2). P. 67–81.
11. Martinelli G. Contributions to a History of Earthquake Prediction Research // *Seismol. Res. Lett.* 2000. V. 71 (5). P. 583–588.
12. Pinault J.-L., Baubron J.-C. Signal processing of diurnal and semidiurnal variations in radon and atmospheric pressure: A new tool for accurate in situ measurement of soil gas velocity, pressure gradient and tortuosity // *J. of Geophys. Res.* V. 102. B8. P. 18101–18120.
13. Tareen A.D.K., Asim K.M., Kearfott K.J., Rafique M., Nadeem M.S.A, Iqbal T., Rahman S.U. Automated anomalous behaviour detection in soil radon gas prior to earthquakes using computational intelligence techniques // *J. of Environ. Radioactivity.* 2019. V. 203. P. 48–54.
14. Torkar D., Zmazek B., Vaupotic J., Kobal I. Application of artificial neural networks in simulating radon levels in soil gas // *Chem. Geol.* 2010. V. 270 (1–40). P. 1–8.
15. Toutain J.-P., Baubron J.-C. Gas geochemistry and seismotectonics: A review // *Tectonophysics.* 1999. V. 304 (1–2). P. 1–27.
16. Woith H. Radon earthquake precursor: A short review // *Eur. Phys. J. Special Topics.* 2015. V. 224. P. 611–627.
17. Zmazek B., Todorovski L., Dzeroski S., Vaupotic J., Kobal I. Application of decision trees to the analysis of soil radon data for earthquake prediction // *Applied Radiation and Isotopes.* 2003. V. 58 (6). P. 697–706.

IRREGULARITIES THE RELATIONSHIP OF VARIATIONS IN THE VOLUME ACTIVITY OF RADON AND ATMOSPHERIC PRESSURE DURING SEISMIC ACTIVITY (ON THE EXAMPLE OF THE BAIKAL REGION)

K. Zh. Seminsky^{a, #} and A. A. Bobrov^a

^a*Institute of the Earth's crust, Siberian Branch of the Russian Academy of Sciences, Irkutsk, Russian Federation*

[#]*E-mail: seminsky@crust.irk.ru*

Presented by Academician of the RAS E.K. Gordeev January 20, 2023

A comparison was made of temporal variations in atmospheric pressure and soil radon concentration measured in loose sediments at three monitoring stations in the Baikal region for the period of manifestation of three fairly strong earthquakes – Bystrinsky (21.09.2020, $K = 14.6$), Kudarinsky (09.12.2020, $K = 14.0$) and Khubsugulsky (11.01.2021, $K = 16.0$). It has been established that the release of radon is controlled in the region by variations of atmospheric pressure. Irregularities of this dependence, first identified in the course of a formalized statistical analysis, occur for each of the studied seismic activations. They are connected with the process of preparing an earthquake, which opens up real opportunities for developing an emanation approach to medium-term forecasting.

Keywords: radon, atmospheric pressure, monitoring, earthquake