

УДК 550.8.05, 004.65, 581.342.2, 537.075

СПЕКТРАЛЬНЫЙ АНАЛИЗ ДАННЫХ ГЕОФИЗИЧЕСКОГО МОНИТОРИНГА

Б. З. Белашев

*Институт геологии КарНЦ РАН, ФИЦ «Карельский научный центр РАН»
(ул. Пушкинская, 11, Петрозаводск, Республика Карелия, Россия, 185910)*

Исследованы временные ряды сейсмического шума, геомагнитных вариаций, объемной активности радона приземного слоя атмосферы. Данные получены геофизическими комплексами, ведущими мониторинговые измерения на территории Республики Карелия. Для рядов, зарегистрированных в условиях низкой сейсмической и геомагнитной активности, рассчитаны их спектры мощности. Близость выявленных периодов рядов к периодам собственных колебаний Земли рассматривается как свидетельство модулирующей и синхронизирующей роли собственных колебаний Земли. Модуляция объемной активности радона в атмосфере собственными колебаниями Земли объяснена транспортом радона на земную поверхность пузырьковыми водородными образованиями.

Ключевые слова: сейсмический шум; геомагнитные вариации; объемная активность радона; спектры мощности; собственные колебания Земли; водородная дегазация

Для цитирования: Белашев Б. З. Спектральный анализ данных геофизического мониторинга // Труды Карельского научного центра РАН. 2023. № 4. С. 5–15. doi: 10.17076/mat1768

Финансирование. Финансовое обеспечение исследований осуществлялось из средств федерального бюджета на выполнение государственного задания КарНЦ РАН (Институт геологии КарНЦ РАН).

B. Z. Belashev. SPECTRAL ANALYSIS OF GEOPHYSICAL MONITORING DATA

*Institute of Geology, Karelian Research Centre, Russian Academy of Sciences
(11 Pushkinskaya St., 185910 Petrozavodsk, Karelia, Russia)*

The time series of seismic noise, geomagnetic variations and radon activity concentration in the atmospheric boundary layer were studied. The data were obtained by geophysical systems providing monitoring measurements in the Republic of Karelia, Russia. The power spectra were calculated and analyzed for the series recorded under low seismic and geomagnetic activity. The similarity of the detected periods of the spectra with periods of the Earth's natural oscillations is regarded as evidence of a modulating and synchronizing role of these oscillations. The modulation of the radon activity concentration in the atmosphere by the Earth's own oscillations is explained by the transport of radon to the Earth's surface by bubble hydrogen formations.

Key words: seismic noise; geomagnetic variations; radonactivity concentration; power spectra; the Earth's natural oscillations; hydrogen degassing

For citation: Belashev B. Z. Spectral analysis of geophysical monitoring data. *Trudy Karelskogo nauchnogo tsentra RAN = Transactions of the Karelian Research Centre RAS*. 2023;4:5–15. doi: 10.17076/mat1768

Funding. The studies were funded from the federal budget through state assignment to the Karelian Research Centre RAS (Institute of Geology KarRC RAS).

ВВЕДЕНИЕ

Исследование опирается на данные геофизического мониторинга по территории Республики Карелия, поступающие от автоматизированных аппаратно-программных комплексов, ведущих инструментальные наблюдения за литосферой и магнитосферой региона [25].

Предметом исследования являются ряды сейсмического шума, геомагнитных вариаций, объемной активности радона, характеризующие состояние геофизической среды. Микросейсмы порождаются землетрясениями, стоячими морскими волнами, циклонами, производственной деятельностью [6]. Их интенсивность зависит от особенностей места регистрации [32]. Геомагнитные вариации связывают с активностью Солнца, процессами в земном ядре, возмущениями магнитосферы, изменением электропроводности и напряженного состояния поверхностных участков земной коры [16]. Эксхалиция радона в атмосферу оказывается чувствительной к геодинамической обстановке, фильтрационным свойствам горных пород. Радон повышает электропроводность приповерхностного слоя атмосферы, вызывает конденсацию водяного пара, образование приземного озона [5]. В живых организмах биологически активные радиоактивные радон и продукты его распада провоцируют онкологические заболевания [31]. При оценке экологической безопасности территорий радоновая съемка является обязательной.

Локальные особенности исследуемых рядов часто рассматривают как предвестники опасных явлений [7, 14]. Нас будут интересовать интегральные характеристики рядов, отражающие ритмы геофизической среды суточного диапазона.

Цель работы – изучение цикличности временных рядов сейсмического шума, геомагнитных вариаций, объемной активности радона в условиях низкой сейсмической и геомагнитной активности. В задачи работы входит расчет спектров мощности указанных рядов, оценка значимости спектральных пиков, сравнение полученных результатов с известными

данными и их интерпретация. При обработке временных рядов использованы традиционные для анализа сигналов преобразования Фурье, Скарлжа, вейвлеты, метод максимума энтропии [8, 29, 34]. Близость периодов описываемых процессов друг к другу и к периодам собственных колебаний Земли рассматривается как свидетельство модулирующей, синхронизирующей роли последних.

Модуляция объемной активности радона собственными колебаниями Земли объяснена транспортом радона из недр к земной поверхности пузырьковыми образованиями.

МАТЕРИАЛЫ И МЕТОДЫ

Регистрация данных

Геомагнитные данные получены в геофизической обсерватории «Петрозаводск». Расположенная в лесном массиве на окраине Петрозаводска, обсерватория испытывает слабое техногенное воздействие города [25]. Измерения вариаций горизонтальных V_x (юг-север), V_y (запад-восток) и вертикальной V_z (к центру Земли) компонент магнитного поля Земли проведено геофизическим комплексом GI MTS-1 [20]. Переориентацию его чувствительного элемента – магнита самарий-кобальтового сплава в меняющемся магнитном поле фиксируют по отраженному от закрепленного на магните зеркала сигналу светодиода. Отклик фотодетекторов фильтруется по низким частотам, усиливается и перераспределяется между АЦП и катушками индуктивности, создающими обратное магнитное поле. Диапазон частот комплекса 0,001–8 Гц, чувствительность 0,1 нТл, динамический диапазон измерений индукции магнитного поля ± 1800 нТл. Дискретность регистрируемых рядов V_x , V_y , V_z составляла 1 с.

Аналогичным образом представлены микросейсмические данные S_z , S_x и S_y , поступающие от ориентированных в вертикальном и горизонтальном направлениях датчиков станции «РІТК» (координаты 61,671 с. ш. 31,266 в. д., открыта 03.06.2014). Сейсмоприемники станции Guralp GMC-6TD [30] уста-

новлены на бетонном основании в специально выстроенном крытом павильоне, расположенном на амфиболитовых базальтах туфогенно-карбонатного горизонта. Из всех станций локальной карельской сети станция в п. Лепшясилта, находящемся примерно в 10 км от г. Питкяранты, имеет самый низкий уровень шума [13].

Объемную активность радона в воздухе подвальных помещений измеряли в деревне Царевичи, г. Питкяранте, районе Петрозаводска Соломенное. Деревня Царевичи находится примерно в 40 км от Петрозаводска на скалистом перешейке между двух малых озер. Производственная деятельность в деревне отсутствует, ее дорожная сеть загружена слабо. По сравнению с другими участками съемки техногенное воздействие на результаты измерений здесь можно считать минимальным.

Мониторинг радона вели сейсмической станцией СРС-05 [22]. С часовой дискретностью станция измеряет объемную активность радона, температуру, давление, влажность воздуха, сохраняет результаты измерений во внутренней памяти. Дополнительные

устройства в составе станции реализуют дистанционное управление, выход в Интернет, передачу данных на ftp-сервер [11]. Данные от аппаратно-программных комплексов по Интернету и мобильной связи поступали на ftp-сервер Института геологии КарНЦ РАН в Петрозаводске. Радиационный фон в пунктах мониторинга радона измеряли в ручном режиме гамма-радиометром СРП-68.

Соответствие условиям слабых геомагнитных возмущений

Соответствие условиям слабых геомагнитных и сейсмических возмущений проверяли по интенсивности высокочастотной компоненты микросейсм и каталогам геомагнитной активности [15]. Для анализа отбирали ряды, соответствующие значениям горизонтальных компонент магнитного поля Земли с разбросом менее 100 нТл и суточными Кр-индексами глобальной геомагнитной активности менее 3. Пример контроля Кр-индексов дает табл. 1, в последней строке которой приведены среднесуточные значения Кр-индексов в течение 20–26 марта 2016 г., не превышающие 2,5.

Таблица 1. Кр-индексы в течение 20–26.03.2016
Table 1. Kp indices in time interval 20–26.03.2016

| Часы\Дни Hours\Date | 20.03 | 21.03 | 22.03 | 23.03 | 24.03 | 25.03 | 26.03 |
|------------------------|-------|-------|-------|-------|-------|-------|-------|
| 0–3 | 1 | 2 | 3 | 2 | 3 | 2 | 0 |
| 3–6 | 2 | 2 | 3 | 2 | 3 | 3 | 0 |
| 6–9 | 3 | 2 | 2 | 3 | 2 | 2 | 1 |
| 9–12 | 2 | 2 | 2 | 4 | 2 | 1 | 1 |
| 12–15 | 2 | 2 | 3 | 2 | 2 | 1 | 0 |
| 15–18 | 3 | 2 | 1 | 2 | 1 | 1 | 1 |
| 18–21 | 3 | 2 | 0 | 1 | 1 | 1 | 1 |
| 21–24 | 4 | 1 | 1 | 2 | 1 | 1 | 1 |
| Среднее Mean | 2,5 | 1,9 | 1,9 | 2,3 | 1,9 | 1,5 | 0,6 |

Из-за технических сбоев в ходе мониторинга не все ряды могли быть привязаны к одному временному промежутку. Продолжительность отобранных для анализа рядов составляла от одной до двух недель. Усреднение данных сейсмического шума и геомагнитных вариаций в часовом интервале дискретизации подавляло высокочастотные флуктуации. В рядах, где необходимо, устраняли линейные тренды. Все ряды центрировали на их средние значения.

Методы обработки и анализа данных

Обработку данных вели в системе компьютерной математики «MATLAB» с применением апробированных методов и программ [8].

Использованы преобразования Фурье, Скарлжа, вейвлеты, метод максимума энтропии (ММЭ) [29]. Основным методом расчета спектральной плотности мощности изучаемых рядов был ММЭ. ММЭ использует авторегрессионную модель данных, представляет ошибку текущего значения линейной комбинацией этого и p предшествующих членов временного ряда. Для гауссовского случайного процесса требование максимума функционала энтропии спектральной мощности при соблюдении условий теоремы Винера–Хинчина для $p + 1$ значений автокорреляционной функции дает спектр мощности сигнала $P(f)$, получаемый делением выходной оценки мощности шума

$2\sigma_a^2$ на квадрат спектральной характеристики «отбеливающего» фильтра

$$P(f) = \frac{2\sigma_a^2}{(1 - \sum_{j=1}^p a(j) \exp(-i2\pi f j))^2},$$

где f – частота ($0 < f < 0,5$), а j – коэффициенты авторегрессии порядка j .

ММЭ оценка спектральной плотности мощности сигнала является несмещенной, положительной. Метод имеет высокое частотное разрешение. К его недостаткам относят отсутствие точных сведений об амплитудах и фазах выделяемых гармоник и необходимость выбора порядка авторегрессии, влияющего на устойчивость спектральных оценок. В расчетах спектров мощности значение порядка авторегрессии $p = 40$. Преобразование Фурье применяли в одном из методов оценивания значимости спектральных пиков, модифицированное преобразование Скарлжа и вейвлеты – при получении амплитудных спектров и вейвлетограмм. По сравнению с преобразованием Фурье преобразование Скарлжа дает более точные значения параметров гармоник. В качестве материнского вейвлета использован вейвлет Морле.

Наличие шумовой компоненты процесса требует оценки значимости пиков спектра. Значимость пиков спектра зависит от метода оценивания [21]. Доверительные интервалы ММЭ оценок спектральной плотности временных рядов объемной активности радона длиной N и дисперсией s^2 получали в предположении χ^2 – распределения ошибок спектральной плотности с $\nu = N/p$ степенями свободы и уровнем доверия α [8, 18].

$$(\nu - 1)s^2/\chi_{\nu-1, 1-\frac{\alpha}{2}}^2 \leq \sigma^2 < (\nu - 1)s^2/\chi_{\nu-1, \frac{\alpha}{2}}^2.$$

В меньшей степени от априорной информации о виде распределения зависит комбинация методов наименьших квадратов и Монте-Карло [12, 24]. Сначала по ММЭ периодам определяли амплитуды и фазы гармоник исходного ряда, решая обратную задачу методом наименьших квадратов со следующей модельной функцией:

$$y(t) = C_0 + \sum_{k=1}^m C_k \sin(2\pi t/T_k + \theta_k). \quad (1)$$

Близость исходного и модельного рядов контролировали по критерию $\chi^2 \cong 1$.

Методом Монте-Карло генерировали 3000 случайных рядов «красного» шума с дисперсией исходного ряда. В рядах, лишенных гармоник, определяли число случаев с амплитудами, равными или превосходящими соответ-

ствующие амплитуды спектральных пиков исходного ряда. Доля таких случаев α от общего числа сгенерированных рядов для каждой гармоники исходного ряда отвечала вероятности $1 - \alpha$, по которой судили о значимости спектрального пика. Уровень значимости α принимали равным 0,05.

РЕЗУЛЬТАТЫ

На рис. 1 показаны ряды сейсмического шума трех ортогональных датчиков станции «РІТК» за период с 20 по 26 сентября 2016 г. и их соответствующие спектры мощности.

На рис. 2 даны ряды геомагнитных вариаций трех ортогональных магнитных датчиков геофизического комплекса GI MTS-1 в интервале с 20 по 26 марта 2016 г. и их спектры мощности.

На рис. 3 представлены ряды объемной активности радона, зарегистрированной в трех населенных пунктах в разные промежутки времени, и их спектры мощности. Узкие пики спектров (б, г) свидетельствуют о высокой добротности и резонансном характере колебаний.

Периоды выявленных гармоник приведены в табл. 2. Табл. 3 содержит параметры рядов и результаты расчетов доверительных интервалов амплитуд ММЭ спектров рядов объемной активности радона. Нижние границы доверительных интервалов на рис. 3 выделены прямыми линиями.

В табл. 4 показаны ММЭ периоды, амплитуды и фазы гармоник, вычисленные согласно формуле (1), соответствующие амплитудам пиков спектров вероятности, полученные методом Монте-Карло. Прошедшие проверку на значимость этим методом спектральные компоненты в табл. 4 выделены жирным шрифтом, в табл. 2 отмечены звездочками. В спектрах рядов сейсмического шума и геомагнитных вариаций интенсивные пики соответствуют суткам, их половине и одной трети. Большая часть пиков близка к периодам собственных колебаний Земли суточного диапазона, приведенным в последних столбцах табл. 2 [4, 17].

Значимые с доверительной вероятностью 0,95, подтвержденные двумя независимыми методами (табл. 3, 4) амплитуды гармоник объемной активности радона отвечают частотам, близким к $\Omega + n\omega$ с $n = 1, 2, 3$. Незначимость амплитуд других гармоник может быть следствием нестационарности радоновой дегазации, отраженной на рис. 4 амплитудными спектрами со скользящим окном 60 отсчетов и вейвлетограммами рядов объемной активности радона.

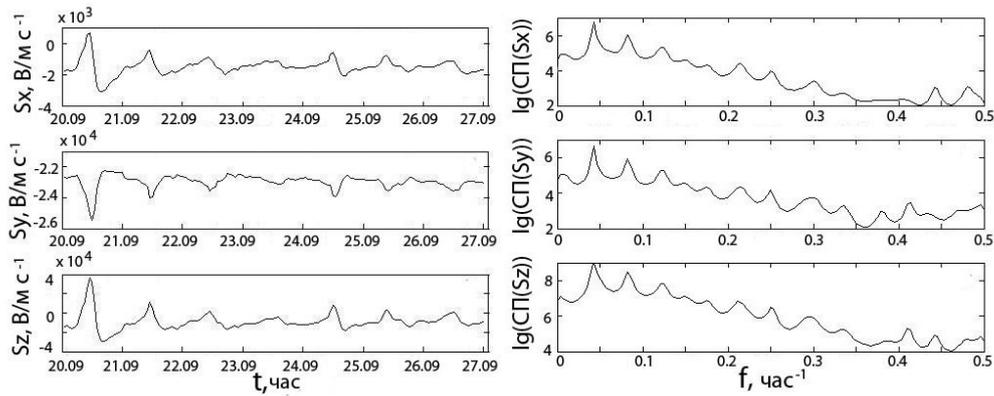


Рис. 1. Временные ряды сейсмического шума S_x , S_y , S_z трех пространственно ориентированных сейсмических датчиков с часовым интервалом дискретизации и их спектры мощности. СП – спектральная плотность
 Fig. 1. Seismic noise series S_x , S_y , S_z of three spatially oriented seismic meters with a one-hour discretization interval and their power spectra. SD – spectral density

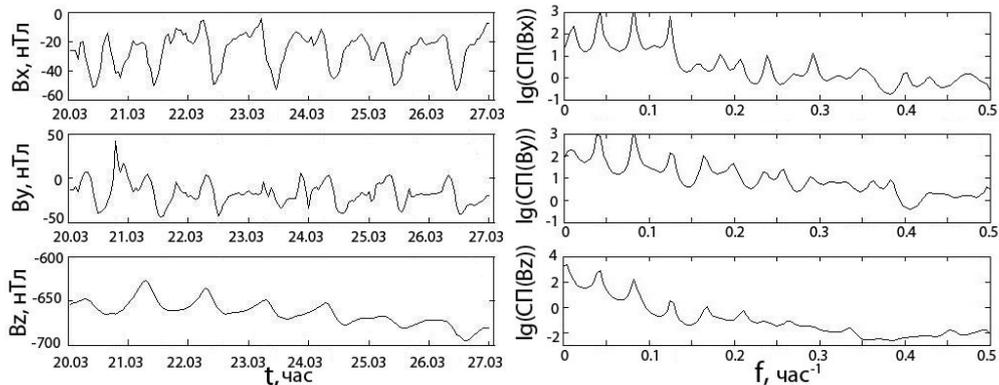


Рис. 2. Вариации трех компонент B_x , B_y , B_z геомагнитного поля 20–26.03.2016 с часовым интервалом дискретизации и их спектры мощности. СП – спектральная плотность
 Fig. 2. Variations in three components B_x , B_y , B_z of a geomagnetic field 20–26.03.2016 with a one-hour discretization period and their power spectra. SD – spectral density

ОБСУЖДЕНИЕ

Территория проведения геофизического мониторинга находится в пределах Карельского кратона. Устойчивость и асейсмичность данного фрагмента земной коры способствует проявлению собственных движений литосферы. Магнитосфера региона, напротив, часто бывает неустойчивой из-за близости к арктическим широтам и авроральной зоне северных сияний. Длительность интервалов ее слабых возмущений в рядах геомагнитных вариаций составляет около недели (табл. 1).

Соломенская брекчия, которой сложены поверхностные слои земной коры в Соломенном и д. Царевичи, имеет низкое содержание урана, калия, тория. Фоновые уровни радиации 0,06–0,12 мкЗв/час не согласуются со значениями объемной активности радона, превышающими нормативные для строений 200 Бк/м³ (рис. 3, а, в, д). По-видимому,

радон на земную поверхность на этих участках поступает из глубоких горизонтов.

Суточная периодичность в рядах сейсмического шума и геомагнитных вариаций отражает чередование дня и ночи, изменение светового, геомагнитного, температурного режима, ритм производственной деятельности. Полусуточную периодичность связывают с приливными явлениями, 8-часовой период – с нелинейностью процессов. Полный набор периодов объяснить только этими явлениями не удастся. Часть периодов можно связать с собственными колебаниями Земли (табл. 2).

Собственные колебания Земли (механические колебания ее упругого тела) делят на сейсмогравитационные колебания – в меняющемся гравитационном поле и крутильные колебания – в постоянном поле. Первый тип регистрируют гравиметры, второй – датчики деформаций, оба типа – сейсмографы.

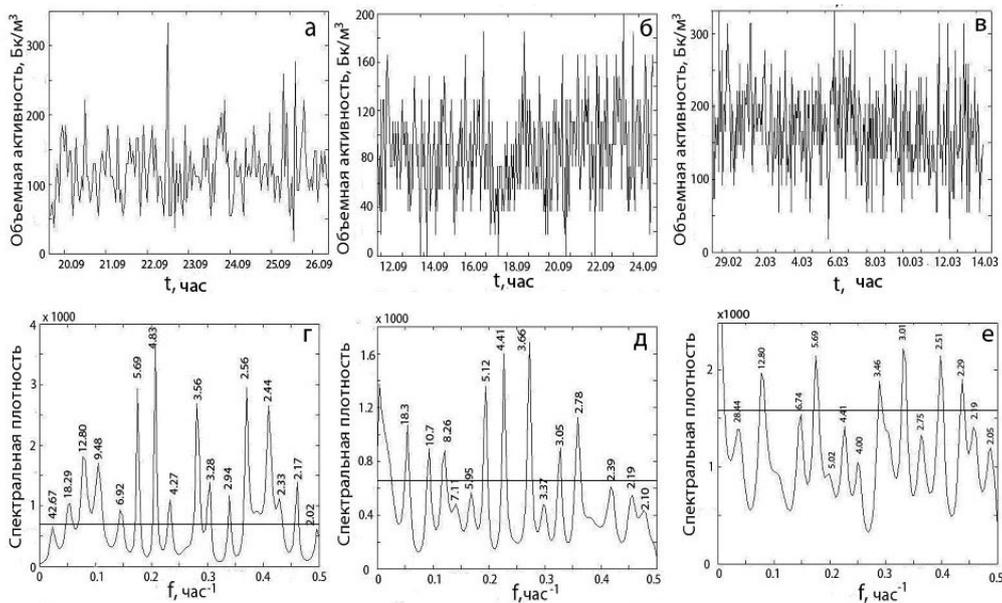


Рис. 3. Временные ряды объемной активности радона в воздухе подвальных помещений в д. Царевичи (2016) (а), Соломенном (2014) (б), г. Питкяранта (2016) (в) и их спектры мощности (г–е соответственно). Прямая на графиках спектров – нижняя граница доверительных интервалов амплитуд пиков с $\alpha = 0,05$ (табл. 3)
 Fig. 3. Volumetric radon activity time series recorded in the air of basements in the village of Tsarevichi (2016) (a), Solomennoye (2014) (b), the City of Pitkyaranta (2016) (c) and their power spectra (г–е, respectively). The straight line in the plots of spectra marks the lower bound of the confidence interval of peak amplitudes with $\alpha = 0,05$ (Table 3)

Линейчатые спектры собственных колебаний используют при проверке моделей внутреннего строения Земли и планет.

Первоначально собственные колебания Земли регистрировали после сильных землетрясений [28]. Их обнаружение в фоновом сейсмическом процессе дало возможность уточнить статистический спектр колебаний, сравнить периоды, полученные разными авторами, подтвердить близость результатов. Периоды колебаний в диапазоне 3,06–6,03 час даны в столбце А табл. 2 [17].

Гармоники с периодами меньше 3,45 часа связывают с космическими ритмами, колебаниями сферической Земли, вариациями атмосферного давления, осцилляциями АЕ индекса [9].

В модели Земли, представляющей систему несферичных, несбалансированных оболочек, цикличность эндогенной активности вызвана гравитационным действием небесных тел [3, 4, 10]. Эта модель вводит новые виды колебаний, например, колебание центра тяжести земного ядра относительно центра тяжести мантии с частотой Ω , соответствующей периоду 4,01 часа. Модулируемое суточным вращением Земли с частотой ω , это колебание порождает гар-

моники с частотами $\Omega \pm n\omega$ (n-натуральное число), периодами, представленными соответственно в столбцах С и В табл. 2.

Модуляция сейсмического шума и геомагнитных вариаций собственными колебаниями Земли известна уже более 30 лет [1, 19, 33]. Ее объясняют высокой чувствительностью пластически деформируемой среды, совершающей скачкообразные переходы из одного метастабильного состояния в другое под действием внешних факторов.

Нестабильный выход радона обычно связывают с местной геодинамикой, атмосферными, техногенными факторами [2]. С собственными колебаниями Земли его ранее не ассоциировали. Отмеченная в табл. 2 близость периодов для объемной активности радона с одной стороны и собственных колебаний Земли, сейсмического шума и геомагнитных вариаций с другой стороны указывает на возможность существования такой связи.

Объяснить подобную модуляцию объемной активности радона в атмосфере можно посредством процесса дегазации Земли. Известно, что в приповерхностные слои грунта и атмосферу тяжелый радон поступает с пузырьковыми образованиями водорода и метана [26].

В отличие от метана, переносящего радон на участках со шлейфами углеводородных скопленений [27], водород является универсальным носителем.

Глобальный характер водородной дегазации подтверждают наблюдения за озоновым слоем, разрушаемым водородом, покидающим планету [23]. Синхронные изменения, фиксируемые на динамических картах содержания

озона в разных местах земного шара, свидетельствуют о едином глубинном источнике водорода. Таким источником считают земное ядро. Колебания ядра модулируют водородную дегазацию, а через нее – эксхалицию радона в атмосферу. На выход радона оказывать влияние могут и другие связанные с колебаниями Земли факторы, такие как раскрытие-сжатие трещин, уровень подземных вод.

Таблица 2. Периоды исследуемых временных рядов и собственных колебаний Земли (час)
Table 2. Periods of the investigated time series and natural oscillations of the Earth (hour)

| Сейсмический шум Seismic noise | | | Геоманнитное поле Geomagnetic field | | | Эксхалиция радона Radon exhalation | | | Петрова [33] | Баркин [4] | |
|-----------------------------------|-------|-------|--|-------|-------|---------------------------------------|-------|-------|-----------------|---------------|--------------------|
| Sx | Sy | Sz | Bx | By | Bz | 1 | 2 | 3 | A | B | C |
| 23,27 | 23,27 | 23,27 | 23,27 | 25,60 | 23,27 | 18,29 | 28,44 | 18,33 | | 23,37 | $\Omega - 7\omega$ |
| 12,19 | 12,19 | 12,19 | 12,19 | 12,19 | 12,19 | 12,80 | 12,80 | 10,70 | | 12,03 | $\Omega - 4\omega$ |
| 8,26 | 8,00 | 8,00 | 8,00 | 8,00 | 8,00 | 9,48 | | 8,26 | | 8,07 | $\Omega - 3\omega$ |
| 6,74 | 6,74 | 6,74 | 6,40 | 6,10 | | 6,92 | 6,74 | 7,11 | | | |
| | | | | | 5,95 | | | 5,95 | 6,03 | 5,97 | $\Omega - 2\omega$ |
| 5,69 | 5,69 | 5,69 | 5,45 | | | 5,69 | 5,69 | | 5,67 | | |
| | | | | 5,02 | | | 5,02 | 5,12 | | | |
| | | 4,75 | 4,83 | | 4,74 | 4,83 | | | 4,75 | 4,80 | $\Omega - \omega$ |
| 4,65 | 4,65 | | | | | | 4,41 | 4,41 | 4,35 | | |
| | | | 4,20 | 4,27 | 4,27 | 4,27 | | | | | |
| 4,00 | 4,00 | 4,00 | | | | | 4,00 | | 4,01 | 4,01 | Ω |
| | | | 3,71 | 3,88 | 3,76 | | | | 3,76 | | |
| | | | | | | 3,56* | | 3,66* | 3,60 | | |
| 3,32 | 3,32 | 3,41 | 3,41 | 3,46 | 3,46 | | 3,48* | 3,37 | 3,41 | 3,43 | $\Omega + \omega$ |
| | | | | 3,16 | | 3,28 | | | 3,21 | | |
| 3,01 | 2,98 | 2,98 | 3,12 | 3,05 | 2,98 | 2,94* | 3,01* | 3,05 | 3,06 | 3,00 | $\Omega + 2\omega$ |
| | | | 2,88 | 2,72 | | | | 2,75* | 2,78* | | |
| 2,64 | 2,64 | 2,59 | | 2,61 | 2,69 | 2,56* | 2,51* | | | 2,66 | $\Omega + 3\omega$ |
| 2,47 | 2,42 | 2,44 | 2,49 | | 2,37 | 2,44 | | 2,39* | | 2,40 | $\Omega + 4\omega$ |
| 2,27 | 2,31 | 2,27 | 2,33 | 2,33 | | 2,33 | 2,29 | | | | |
| | | | | 2,25 | 2,21 | 2,17 | 2,19 | 2,19 | | 2,18 | $\Omega + 5\omega$ |

Примечание. 1 – Царевичи, 2 – Питкяранта, 3 – Соломенное.
Note. 1 – Tsarevichi, 2 – Pitkyaranta, 3 – Solomennoye.

Таблица 3. Данные рядов активности радона и доверительные интервалы амплитуд пиков их ММЭ спектров
Table 3. Confidence intervals of MME peak amplitudes of radon volumetric activity time series spectra

| Параметры\Пункт Parameters\Settlement | Царевичи Tsarevichi | Питкяранта Pitkyaranta | Соломенное Solomennoye |
|---|------------------------|---------------------------|---------------------------|
| Длина ряда N , час Length of time series N , hour | 162 | 359 | 316 |
| Дисперсия ряда s^2 , Бк ² /м ⁶ Variance s^2 , Bq ² /m ⁶ | 2260,2 | 3488,6 | 1509 |
| Число степеней свободы $\nu = \text{int}(N/p)$ Number of degrees of freedom $\nu = \text{int}(N/p)$ | 4 | 9 | 8 |
| Доверительный интервал σ^2 , Бк ² /м ⁶ Confidence interval σ^2 , Bq ² /m ⁶ | [726 31421] | [1592 12804] | [660 6250] |

Таблица 4. Параметры гармоник рядов объемной активности радона в методах МНК и Монте-Карло
 Table 4. Harmonics parameters of radon volumetric activity series in LS and Monte Carlo methods

| Царевичи Tsarevichi | | | | Питкяранта Pitkyaranta | | | | Соломенное Solommennoye | | | |
|-------------------------|--|----------------------------------|------------------------------|---------------------------|--|----------------------------------|------------------------------|----------------------------|--|----------------------------------|------------------------------|
| T , час T , hour | C , Бк/м ³ C , Bq/m ³ | θ , рад θ , rad | $1 - \alpha$ $1 - \alpha$ | T , час T , hour | C , Бк/м ³ C , Bq/m ³ | θ , рад θ , rad | $1 - \alpha$ $1 - \alpha$ | T , час T , hour | C , Бк/м ³ C , Bq/m ³ | θ , рад θ , rad | $1 - \alpha$ $1 - \alpha$ |
| 42,67 | 9,24 | -0,49 | 0,034 | 28,44 | 9,63 | -3,07 | 0,069 | 18,33 | 6,41 | 0,03 | 0,143 |
| 18,29 | 8,16 | -2,26 | 0,068 | 12,80 | 5,18 | -2,01 | 0,067 | 12,80 | 3,00 | -2,99 | 0,056 |
| 12,80 | 13,89 | -2,71 | 0,318 | 6,74 | 2,67 | 2,51 | 0,068 | 10,70 | 3,61 | -2,70 | 0,108 |
| 9,48 | 12,24 | -1,32 | 0,402 | 5,69 | 8,42 | 2,87 | 0,593 | 8,26 | 3,90 | -0,77 | 0,205 |
| 6,92 | 7,74 | 2,57 | 0,330 | 5,02 | 9,34 | -0,95 | 0,77 | 7,11 | 1,23 | -0,19 | 0,025 |
| 5,69 | 12,66 | 1,35 | 0,796 | 4,41 | 2,85 | 1,87 | 0,161 | 5,95 | 3,74 | 0,50 | 0,320 |
| 4,83 | 12,35 | -0,96 | 0,830 | 4,00 | 3,27 | 1,29 | 0,244 | 5,12 | 3,77 | -2,75 | 0,391 |
| 4,27 | 8,81 | 1,10 | 0,693 | 3,48 | 11,92 | 2,94 | 0,987 | 4,41 | 2,08 | 0,96 | 0,189 |
| 3,56 | 13,74 | -0,35 | 0,980 | 3,01 | 12,37 | 0,88 | 0,995 | 3,66 | 10,64 | 1,64 | 0,997 |
| 3,28 | 7,96 | 1,71 | 0,741 | 2,75 | 10,84 | -2,98 | 0,994 | 3,37 | 3,62 | 0,50 | 0,605 |
| 2,94 | 10,15 | -1,72 | 0,953 | 2,51 | 11,08 | 0,31 | 0,998 | 3,05 | 5,40 | -0,03 | 0,895 |
| 2,56 | 13,01 | 1,79 | 0,988 | 2,29 | 6,34 | -2,52 | 0,860 | 2,78 | 6,02 | -1,32 | 0,952 |
| 2,44 | 9,61 | -1,72 | 0,941 | 2,19 | 4,22 | -0,71 | 0,588 | 2,39 | 6,92 | -0,99 | 0,997 |
| 2,33 | 2,37 | 2,79 | 0,153 | | | | | 2,19 | 1,80 | -3,08 | 0,283 |
| 2,17 | 8,31 | 2,94 | 0,882 | | | | | 2,10 | 2,09 | 1,71 | 0,375 |

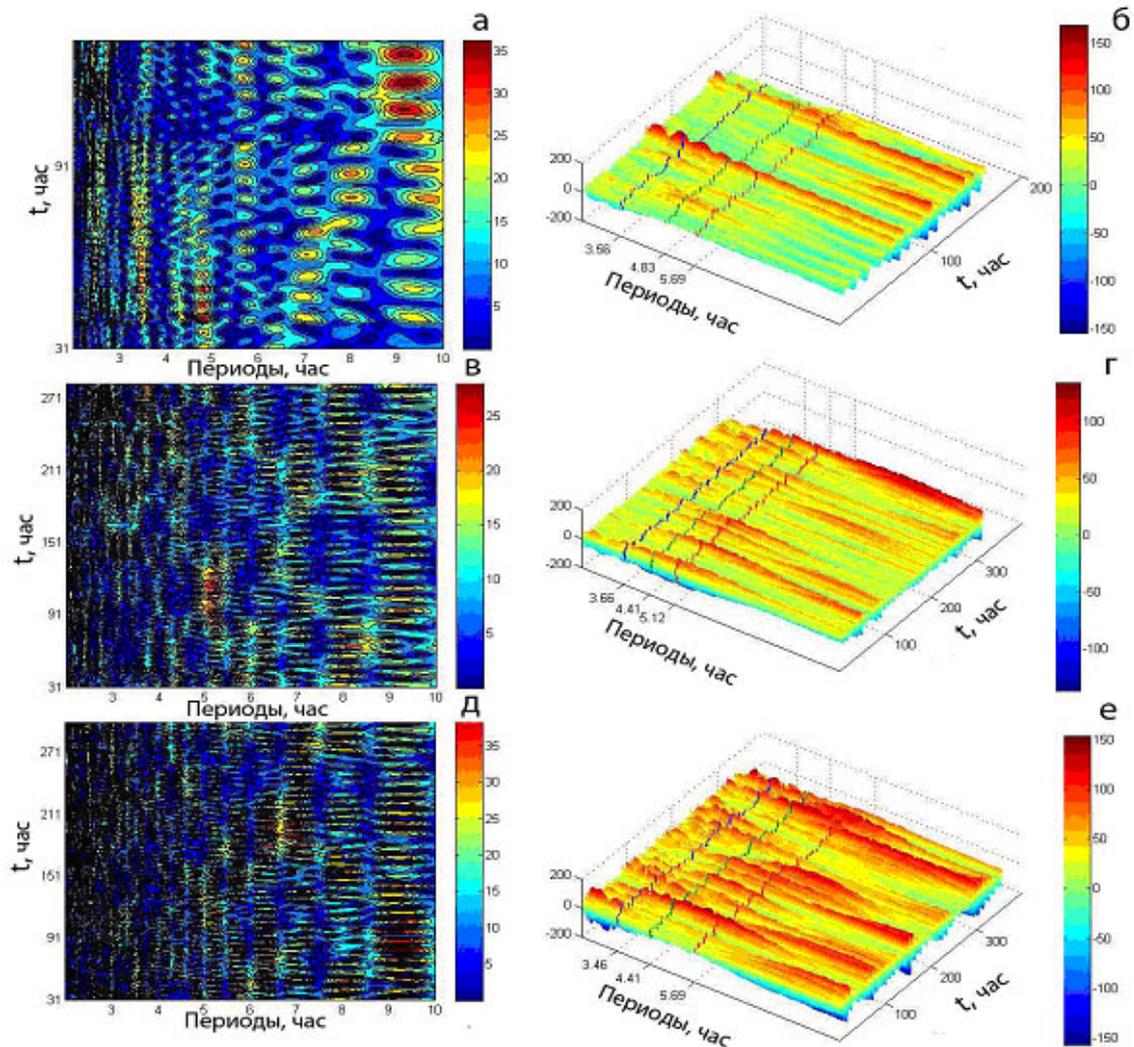


Рис. 4. Амплитудные спектры временных рядов объемной активности радона, зарегистрированных в деревне Царевичи (а), в Соломенном (в) и г. Питкяранта (д) (рис. 3), и вейвлетограммы этих рядов (б), (г), (е) соответственно. На вейвлетограммах показаны изменения основных гармоник спектров на рис. 3
 Fig. 4. Amplitude spectra of volumetric radon activity series recorded in the village of Tsarevichi (a), Solommennoye (c) and the City of Pitkyaranta (e) (Fig. 3) and waveletograms of these series – (б), (г), (е), respectively. Alterations of the basic harmonics of spectra in Fig. 3 are shown in waveletograms

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

1. Инструментальные автоматизированные комплексы, ведущие мониторинг литосферы и магнитосферы на территории Карелии, дают содержательный материал для анализа цикличности геофизических процессов.

2. Информативными являются временные ряды сейсмического шума, геомагнитных вариаций, объемной активности радона, зарегистрированные в условиях низкой сейсмической и геомагнитной активности.

3. Близость периодов гармоник спектров мощности этих рядов к периодам собственных колебаний Земли свидетельствует о модулирующей, синхронизирующей роли последних. Если для сейсмического шума (акустической эмиссии), вариаций геомагнитного поля такая модуляция известна, то для объемной активности радона рассматривается впервые.

4. Модуляция объемной активности радона собственными колебаниями Земли согласуется с механизмом транспорта радона в атмосферу пузырьковыми водородными образованиями. Модулируемые колебаниями земного ядра, потоки этих образований переносят тяжелый радон из верхних слоев земной коры в атмосферу.

ЛИТЕРАТУРА

1. Антонов Ю. В., Антонова И. Ю., Рыбин А. К., Щелочков Г. Г. Модуляция вариаций вертикального градиента силы тяжести и электромагнитного поля собственными колебаниями Земли // Изв. вузов. Геология и разведка. 2010. № 6. С. 101–105.
2. Аптикаева О. И., Костенко К. А., Сельюков Е. И., Стигнеева Л. Т., Черепанов О. А. Особенности ритмической структуры рядов объемной активности радона при регистрации в условиях мегаполиса // Атлас временных вариаций природных, антропогенных и социальных процессов. Сер. Человек и три окружающие его среды. М.: Янус-К, 2013. Т. 5. С. 255–264.
3. Баркин Ю. В. Дрейф центра масс Земли и вековые вариации силы тяжести // Геофизические исследования. 2010. Т. 11. С. 18–31.
4. Баркин Ю. В. Объяснение эндогенной активности планет и спутников и ее цикличности // Изв. РАЕН. Секция наук о Земле. 2002. Вып. 9. С. 45–97.
5. Белашев Б. З., Горьковец В. Я. Экологические аспекты дегазации радона // Энергия. Техника. Экономика. Экология. 2015. № 9. С. 38–48.
6. Богомолов Л. М. От исследования штормовых микросейсм к анализу сейсмо-ионосферных эффектов // Вестник ДВО РАН. 2011. № 6. С. 27–33.
7. Божов В. Н., Воробьев В. Н. Прогнозы сейсмических событий с использованием геофизических и атмосферных предвестников // Ученые записки РГГМУ. 2015. № 44. С. 141–152.
8. Вишератин К. Н., Карманов Ф. И. Практические методы оценивания спектральных параметров. Обнинск: ИАТЭ, 2008. 60 с.
9. Владимирский Б. М., Конрадов А. А. Космическая физика, геофизика и внутрисуточные биологические ритмы // Ученые записки Таврического национального университета им. В. И. Вернадского. 2007. Т. 20(59), № 1. С. 92–100.
10. Гончаров М. А., Разницын Ю. Н., Баркин Ю. В. Особенности деформации континентальной и океанической литосферы как следствие северного дрейфа ядра Земли // Геодинамика и тектонофизика. 2012. Т. 3, № 1. С. 27–54. doi: 10.5800/GT-2012-3-1-0060
11. Долгий К. А., Белашев Б. З. Аппаратно-программный комплекс сейсмической радоновой станции // Фундаментальные исследования. 2017. № 10. С. 206–211.
12. Зельк Я. И., Степанян Н. Н., Андреева О. А. Спектральные методы анализа вращения солнечных структур // Изв. Крым. обс. 2007. Т. 103, № 1. С. 56–69.
13. Зуева И. А., Лебедев А. А. Сейсмический эффект промышленных взрывов Костомукшского ГОК // Вестник НГТУ. 2020. Т. 23, № 1. С. 22–28. doi: 10.21443/1560-9278-2020-23-1-22-28
14. Купцов А. В., Ларионов И. А., Шевцов Б. М. Особенности геоакустической эмиссии при подготовке Камчатских землетрясений // Вулканология и сейсмология. 2005. № 5. С. 45–49.
15. Лаборатория «Рентгеновская астрономия солнца» ФИАН. URL: https://lebedev.ru/ru/main-structure/main-units/optics.html?id_level=786 (дата обращения: 11.04.2023).
16. Максимочкин В. И. Геомагнитные вариации и магнитосфера Земли. М.: МГУ, 2014. 115 с.
17. Петрова Л. Н., Беляков А. С., Николаев А. В. Акустическая эмиссия и сейсмогравитационные колебания Земли как связанные компоненты при изучении внутриклинной динамики // Российско-китайский журнал «Исследования по прогнозу землетрясений». 1996. Т. 5, № 2. С. 211–223.
18. Рыбак О. О. Спектральная структура изотопного состава антарктических ледовых кернов: сравнение оценок Ломба-Скаргла и максимальной энтропии // Изв. вузов. Северо-Кавказский регион. 2007. № 6. С. 50–56.
19. Рыкунов Л. Н., Хаврошкин О. Б., Цыпलाков В. В. Эффект модуляции сейсмических шумов Земли 25 лет спустя. Второе сообщение // Наука и технология в России. 1998. Т. 358, № 1. С. 16–19.
20. Сергушин П. А. Магнитовариометр как средство измерения магнитных полей // Вестник ИТМО. 2006. Т. 6, № 5. С. 173–175.

21. Серебрянников М. Г., Первозванский А. А. Выявление скрытых периодичностей. М.: Физматгиз, 1965. 244 с.
22. СРС-05 Сейсмическая радоновая станция. URL: <http://ntm.ru/products/133/7832> (дата обращения: 11.04.2023).
23. Сывороткин В. Л. Озонная методика изучения водородной дегазации Земли // Электронное научное издание Альманах Пространство и время. 2013. Т. 4, № 1.
24. Тербиж В. Ю. Анализ временных рядов в астрофизике. М.: Наука, 1992. 388 с.
25. Шаров Н. В. Геофизическая обсерватория «Петрозаводск» // Труды Карельского научного центра РАН. 2013. № 1. С. 169–171.
26. Шулейкин В. Н. Перенос радона в приповерхностные слои грунта и приземную атмосферу // Геофизические процессы и биосфера. 2013. Т. 12, № 2. С. 57–66. doi: 10.1134/S0001433813080069
27. Шулейкин В. Н., Щужин Г. Г. Исследование вариаций атмосферного электрического поля в районах нефтяных месторождений нефти и газа // Метеорология и гидрология. 2015. № 2. С. 21–29. doi: 10.3103/S106837391502003X
28. Bogert B. P. An observation of free oscillations of the Earth // Journal of Geophysical Research. 1961. Vol. 66(2). P. 643–646.
29. Burg J. P. The relationship between maximum entropy spectra and maximum likelihood spectra // Geophysics. 1972. Vol. 37. P. 275–276.
30. GURALP CMG-6TD Digital output broad band seismometer. URL: https://dsys.ru/images/photos/pictures/Soft/Velosimetr/РЭ_CMG_6TD.pdf (дата обращения: 11.04.2023).
31. Ionizing radiation: sources and biological effects. Presentation at the UN General Assembly. 1988. Vol. 1.
32. Maxwell S. C., Urbancic T. I. The role of passive micro seismic monitoring in the instrumental oil field // The Leading Edge. 2001. Vol. 20(6). P. 636–639.
33. Petrova L. N. Seismogravitational oscillation of the Earth from observation by spaced vertical pendulums in Eurasia // Izvestiya. Physics of the Solid Earth. 2002. Vol. 38(4). P. 325–336.
34. Scargle J. D. Studies in astronomical time series analysis. Statistical aspects of spectral analysis of unevenly spaced data // The Astrophysical Journal. 1982. Vol. 263. P. 835–853.
- Higher Educational Establishments. *Geology and Exploration*. 2010;6:101–105. (In Russ.)
2. Aptikaeva O. I., Kostenko K. A., Selyukov E. I., Stigneeva L. T., Cherepanov O. A. Features of the rhythmic structure of the series of volumetric activity of radon during registration in a megalopolis. *Atlas vremennykh variatsii prirodnnykh, antropogennykh i sotsial'nykh protsessov. Ser. Chelovek i tri okruzhayushchie ego sredy = Atlas of time variations of natural, anthropogenic and social processes*. Moscow: Yanus-K; 2013. Vol. 5. P. 255–264.
3. Barkin Yu. V. Drift of the Earth's centre of mass and secular variations in gravity. *Geofizicheskie issledovaniya = Journal of Geophysical Research*. 2010;11:18–31. (In Russ.)
4. Barkin Yu. B. Explanation of endogenous activity of planets and satellites and its cyclicity. *Izvestiya Sektsii nauk o Zemle Rossiiskoi akademii estestvennykh nauk = Proceedings of the Earth Sciences Section of the Russian Academy of Natural Sciences*. 2002;9:45–97. (In Russ.)
5. Belashev B. Z., Gor'kovets V. Ya. Ecological aspects of radon degassing. *Energiya. Tekhnika. Ekonomika. Ekologiya = Energy. Technologies. Economy. Ecology*. 2015;9:38–48. (In Russ.)
6. Bogomolov L. M. From the study of storm microseisms to the analysis of seismo-ionospheric effects. *Vestnik DVO RAN = Vestnik of the Far East Branch RAS*. 2011;6:27–33. (In Russ.)
7. Bokov V. N., Vorob'ev V. N. Seismic event predictions with the use of geophysical and atmospheric precursors. *Uchenye zapiski RGGMU = Proceedings of the Russian State Hydrometeorological University*. 2015;44:141–152. (In Russ.)
8. Visheratin K. N., Karmanov F. I. Practical methods for assessing spectral parameters. Obninsk: IATE; 2008. 60 p. (In Russ.)
9. Vladimirskii B. M., Konradov A. A. Space physics, geophysics and daily biological rhythms. *Uchenye zapiski Tavricheskogo natsional'nogo universiteta im. V. I. Vernadskogo = Scientific Notes of V. I. Vernadsky Crimean Federal University*. 2007;20(1):92–100. (In Russ.)
10. Goncharov M. A., Raznitsin Yu. N., Barkin Yu. V. Specific features of deformation of the continental and oceanic lithosphere as a result of the Earth core northern drift. *Geodinamika i tektonofizika = Geodynamics & Tectonophysics*. 2012;3(1):27–54. doi: 10.5800/GT-2012-3-1-0060 (In Russ.)
11. Dolgii K. A., Belashev B. Z. Hardware-software complex of seismic radon station. *Fundamental'nye issledovaniya = Fundamental Research*. 2017;10: 206–211. (In Russ.)
12. Zelyk Ya. I., Stepanyan N. N., Andreeva O. A. Spectral methods for analyzing the rotation of solar structures. *Izv. Krym. Obs. = Proceedings of the Crimean Astrophysical Observatory*. 2007;103(1):56–69. (In Russ.)

REFERENCES

1. Antonov Yu. V., Antonova I. Yu., Rybin A. K., Shchelochkov G. G. Modulation of variations in the vertical gradient of gravity and the electromagnetic field by natural oscillations of the Earth's. *Izv. vuzov. Geologiya i razvedka = Proceedings of*

13. Zueva I. A., Lebedev A. A. Seismic effect of industrial explosions of GOK Kostomuksha. *NSTU Vestnik = Vestnik of NSTU*. 2020;23(1):22–28. doi: 10.21443/1560-9278-2020-23-1-22-28 (In Russ.)
14. Kuptsov A. V., Larionov I. A., Shevtsov B. M. Features of geoacoustic emission during the preparation of the Kamchatka earthquake. *Vulkanologiya i seismologiya = Volcanology and Seismology*. 2005;5:45–49. (In Russ.)
15. Laboratory of X-Ray Astronomy of the Sun, LPI RAS. URL: https://lebedev.ru/ru/main-structure/main-units/optics.html?id_level=786 (accessed: 11.04.2023). (In Russ.)
16. Maksimochkin V. I. Geomagnetic variations and the Earth's magnetosphere. Moscow: MSU; 2014. 115 p. (In Russ.)
17. Petrova L. N., Belyakov A. S., Nikolaev A. V. Acoustic emission and seismogravitational oscillations of the Earth as coupled components in the study of intrawedge dynamics. *Rossiisko-kitaiskii zhurnal «Issledovaniya po prognozu zemletryaseni» = Russian-Chinese Journal 'Research of Earthquake Prediction'*. 1996;5(2):211–223. (In Russ.)
18. Rybak O. O. Spectral structure of the isotopic composition of Antarctic ice core samples: Comparison of the Lomb–Scargle estimates and maximum entropy. *Izv. Vuzov. Severo-Kavkazskii region = Bulletin of Higher Education Institutes. North Caucasus Region*. 2007;6:50–56. (In Russ.)
19. Rykunov L. N., Khavroshkin O. B., Tsyplakov V. V. The effect of modulation of the Earth's seismic noise 25 years later. Second note. *Nauka i tekhnologiya v Rossii = Science and Technologies in Russia*. 1998;358(1):16–19. (In Russ.)
20. Sergushin P. A. Magnetovariometer as a means of measuring magnetic fields. *Vestnik ITMO = Proceedings of ITMO*. 2006;6(5):173–175. (In Russ.)
21. Cerebrennikov M. G., Pervozvanskii A. A. Revealing hidden periodic sequences. Moscow: Fizmatgiz; 1965. 244 p. (In Russ.)
22. SRS-05 Seismic radon station. URL: <http://ntm.ru/products/133/7832> (accessed: 11.04.2023). (In Russ.)
23. Syvorotkin V. L. Ozone method for Earth hydrogen degassing study. *Elektronnoe nauchnoe izdanie Al'manakh Prostranstvo i vremya = Electronic Scientific Edition of e-Almanac 'Space and Time'*. 2013;4(1). (In Russ.)
24. Terebizh V. Yu. Time series analysis in astrophysics. Moscow: Nauka; 1992. 388 p. (In Russ.)
25. Sharov N. V. Petrozavodsk Geophysical Observatory. *Trudy Karel'skogo nauchnogo tsentra RAN = Transactions of the Karelian Research Centre RAS*. 2013;1:169–171. (In Russ.)
26. Shuleikin V. N. Radon transport to the near-surface soil and air layers. *Izv. Atmos. Ocean. Phys.* 2013;49:853–859. doi: 10.1134/S0001433813080069 (In Russ.)
27. Shuleikin V. N., Shchukin G. G. Studying the variations of atmospheric electric field in the areas of oil and gas fields. *Russ. Meteorol. Hydrol.* 2015;40: 85–91. doi: 10.3103/S106837391502003X (In Russ.)
28. Bogert B. P. An observation of free oscillations the Earth. *Journal of Geophysical Research*. 1961;66(2):643–646.
29. Burg J. P. The relationship between maximum entropy spectra and maximum likelihood spectra. *Geophysics*. 1972;37:275–276.
30. GURALP CMG-6TD Digital output broad band seismometer. URL: https://dsys.ru/images/photos/pictures/Soft/Velositetr/PЭ_CMG_6TD.pdf (accessed: 11.04.2023).
31. Ionizing radiation: sources and biological effects. Presentation at the UN General Assembly. 1988. Vol. 1.
32. Maxwell S. C., Urbancic T. I. The role of passive micro seismic monitoring in the instrumental oil field. *The Leading Edge*. 2001;20(6):636–639.
33. Petrova L. N. Seismogravitational oscillation of the Earth from observation by spaced vertical pendulums in Eurasia. *Izvestiya. Physics of the Solid Earth*. 2002;38(4):325–336.
34. Scargle J. D. Studies in astronomical time series analysis. Statistical aspects of spectral analysis of unevenly spaced data. *The Astrophysical Journal*. 1982;263:835–853.

Поступила в редакцию / received: 11.04.2023; принята к публикации / accepted: 02.05.2023.

Автор заявляет об отсутствии конфликта интересов / The author declares no conflict of interest.

СВЕДЕНИЯ ОБ АВТОРЕ:

Белашев Борис Залманович
д-р техн. наук, ведущий научный сотрудник
e-mail: belashev@krc.karelia.ru

CONTRIBUTOR:

Belashev, Boris
Dr. Sci. (Tech.), Leading Researcher